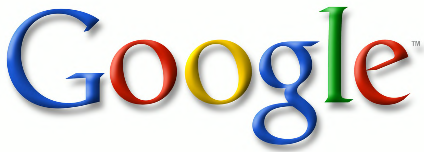
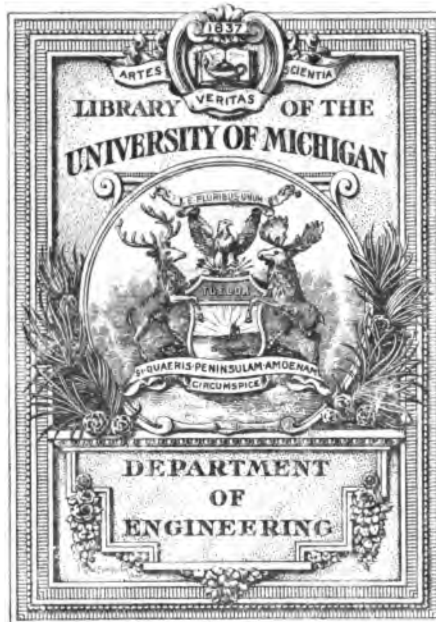



1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE
DEPARTMENT
OF
ENGINEERING

Tq!0. 9 tirad

LA

TRACTION MÉCANIQUE

DES TRAMWAYS

PAR

M. E. de MARCHENA

INGÉNIEUR DE L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES

EXTRAIT DES MÉMOIRES DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE

(Bulletin de juillet 1894)

PARIS

E. BERNARD ET Cie, ÉDITEURS

53ter, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 53ter

1895

LA TRACTION MÉCANIQUE DES TRAMWAYS

PAR

M. E. de MARCHENA

INGÉNIEUR DE L'ÉCOLE CENTRALE DES ARTS ET MANUFACTURES

EXTRAIT DES MÉMOIRES DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE

(Bulletin de juillet 1894)

PARIS

E. BERNARD ET Cie, ÉDITEURS

53ter, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 53ter

—

1895

LA

TRACTION MÉCANIQUE DES TRAMWAYS

PAR

M. E. de MARCHENA

INTRODUCTION

Depuis quelques années, la question de la substitution de la traction mécanique à la traction animale pour le service des tramways est plus que jamais à l'ordre du jour, et le haut prix des fourrages l'an dernier, en imposant de si lourds sacrifices à presque toutes les Compagnies, est venu donner un regain d'actualité à cette question.

Divers systèmes qui ont tous fait leurs preuves se partagent la faveur des Compagnies et celle du public. Mais aucun d'eux jusqu'à présent n'a affirmé d'une manière vraiment indiscutable sa supériorité sur ses rivaux et ceci paraît tenir non seulement aux difficultés de comparaison équitable dans les mille applications différentes avec des conditions locales si diverses, mais aussi à ce qu'en réalité le système idéal n'existe pas et ne peut exister, chaque système ayant ses imperfections compensées par des avantages qui le désignent plus spécialement que les autres pour telle application particulière, de sorte que tel système qui se sera montré supérieur dans certaines conditions, ne donnerait dans telles autres que des résultats médiocres.

Les compétitions ardentes des différents inventeurs qui s'accordent parfaitement à voir avec des lunettes grossissantes la paille qui est dans l'œil de leur prochain en refusant d'apercevoir celle plus ou moins grosse qui obstrue le leur, n'ont pas été faites pour éclaircir la question.

Conditions dans lesquelles la traction mécanique est avantageuse.

§ 1. — Mais, d'abord, quand peut-on et doit-on employer la traction mécanique de préférence à la traction animale? La question se pose d'une manière bien différente suivant que la ligne est à créer ou déjà établie.

En effet, s'il s'agit d'une ligne déjà établie et fonctionnant par traction animale, la substitution de la traction mécanique entraînera des frais et des dépenses qui n'auraient pas à entrer en ligne de compte si la ligne était seulement à l'état de projet, et qu'il faudra complètement amortir avec les excédents de bénéfices avant de trouver aucun profit à l'opération.

Il faudra, en effet, vendre la cavalerie, toujours à perte, transformer les dépôts, remplacer les écuries, magasins et bâtiments divers par d'autres d'une nature tout à fait différente et modifier complètement le service de l'exploitation.

Enfin il faudra le plus souvent remplacer complètement la voie ; telle voie suffisamment résistante pour la traction animale, ne l'est pas du tout assez pour permettre le passage des moteurs mécaniques et quoiqu'on ait bien souvent, par des motifs d'économie, passé par-dessus cette considération, on a payé cette erreur par des frais anormaux d'entretien et de réfection qui ont rapidement obligé de recourir dans la suite à la mesure radicale que l'on avait espéré pouvoir éviter.

L'ensemble considérable des frais que nécessite une modification si profonde dans le service arrête généralement les Compagnies, à moins que les avantages résultant de la traction mécanique soient tels qu'il ne puisse y avoir d'hésitation possible.

Mais, dans ce cas, il faut obtenir une augmentation suffisante de la durée de la concession pour permettre l'amortissement de ces dépenses.

Au contraire, quand la ligne est à créer, on peut prévoir à loisir, dès l'origine, l'installation de la voie et des bâtiments annexes pour les besoins du système adopté et dès lors il ne reste plus à comparer que les prix de revient et les résultats économiques, qui sont presque toujours en faveur de la traction mécanique.

Un facteur très important, dont il doit être tenu compte, consiste dans les goûts du public à desservir, dans ses exigences, dans la préférence qu'il accorde (toutes autres questions réservées) à tel ou tel moyen de locomotion.

En général, la traction mécanique, sauf de rares exceptions, a la faveur du public ; elle donne plus de régularité et de rapidité au service, elle permet de desservir plus aisément les profils accidentés et d'éviter sur les fortes rampes ces montées si lentes et si pénibles qui l'énervent et l'impatientent. Elle permet généralement de donner plus de confortable et même de luxe aux voyageurs, ce qui est sensiblement apprécié par lui, même pour les faibles distances qui sont ordinairement franchies en tramway. Enfin on peut même dire sans craindre d'être taxé de puérilité, que sa rareté relative est un nouvel attrait pour les masses qui forment la grosse clientèle de ce genre de transport et qui sont souvent séduites par la nouveauté et l'originalité de ces systèmes de locomotion dont le mécanisme leur échappe.

Il faut aussi tenir compte évidemment des circonstances particulières que présentent les régions à desservir : prix des différentes mains-d'œuvre, prix du combustible, prix des chevaux et des fourrages. Il y a des pays, comme le Brésil, le Mexique, la République Argentine où la force motrice revient à un prix très élevé par suite de la cherté du combustible et où, par contre, les animaux (chevaux ou mules) coûtent bon marché d'achat et d'entretien. En outre, dans ces pays, la main-d'œuvre spéciale qui doit être, en général, recrutée parmi des ouvriers européens coûte cher, tandis que les vulgaires manœuvres, les cochers, palefreniers, etc., qu'on peut recruter parmi les gens du pays, coûtent très bon marché.

Dans de pareilles conditions la traction mécanique ne peut évidemment être avantageuse et elle est réservée aux chemins de fer véritables. On peut même citer dans ces pays des applications de la traction animale à des réseaux qui, par leur longueur et leur importance, pourraient être assimilés à de véritables chemins de fer vicinaux ; par exemple, le tramway rural de Buenos-Ayres se développant à travers les vastes plaines de la province sur une longueur de près de 400 kilomètres, la ligne d'Esperanza à Téhuacan, au Mexique, longue de 80 kilomètres où la traction se fait par mules, le réseau de tramways de la province de San Paolo, au Brésil, qui emploie le même système de traction, etc.

Toutefois ces circonstances particulières ne se rencontrent guère en Europe où presque partout on trouve le combustible et la main-d'œuvre à des prix raisonnables.

Il faut enfin tenir compte des conditions du trafic et du service qu'il s'agit de remplir. Quand il s'agit de lignes de faible impor-

tance, à petit trafic, à profil peu accidenté, desservies par de petites voitures à un cheval, se succédant à intervalles éloignés, la traction mécanique ne peut en général pas lutter. Elle ne trouve pas dans un pareil service l'occasion de déployer ses qualités spéciales et les recettes ne permettent pas de rémunérer la plus-value importante des frais de premier établissement tant en ce qui concerne la voie qu'en ce qui concerne le matériel de traction.

Au contraire, quand il s'agit de lignes plus importantes à profil accidenté, à trafic considérable et irrégulier, les conditions changent complètement. La traction animale est alors coûteuse ; elle nécessite une cavalerie considérable et des installations importantes d'écuries, de magasins à fourrage, etc. ; il lui est impossible de permettre l'amélioration des services, la rapidité de la circulation, l'accroissement du trafic, sans augmenter énormément les frais d'exploitation.

Quand le profil présente de fortes rampes, ces inconvénients sont encore aggravés ; l'effort que peut donner un attelage étant limité, on est obligé pour remonter ces rampes d'employer des chevaux de secours spécialement destinés à ce service, ce qui augmente sensiblement les frais de traction.

La vitesse moyenne est alors très réduite et il en est de même du parcours journalier que peuvent effectuer chaque voiture et le personnel affecté à son service ; l'utilisation de ces voitures et du personnel est donc mauvaise.

Le nombre des places offertes au public est limité et le service ne présente pas de réserve de puissance pour subvenir aux cas d'encombrement quand une fête, une journée de beau temps, une circonstance quelconque amènent sur la ligne un afflux considérable de voyageurs ; aussi voit-on ces jours-là se presser inutilement aux stations des masses compactes qu'il est impossible d'enlever et ce devient un véritable problème pour le malheureux promeneur que de ramener au logis la petite famille qu'il a aventurée trop loin.

L'hiver, la neige, le sol humide et glissant sont la source de nouvelles difficultés ; que de fois ne voit-on pas à ces mauvais moments les tramways, trop chargés de monde, rester en détresse sur les rampes que l'attelage épuisé est dans l'impossibilité de remonter.

Avec les meilleurs soins la mortalité des chevaux ne descend guère au-dessous de 3 ou 4 0/0 par an et il y en a constamment

en moyenne de 8 à 10 0/0 à l'infirmerie. Les arrêts et démarrages fréquents leur sont particulièrement funestes et à ce dur service ils s'usent et se déprécient rapidement. Aussi le renouvellement et le bon entretien de la cavalerie grèvent-ils les frais d'exploitation d'une manière très onéreuse.

En raison du poids mort qu'il importe de réduire au minimum, il n'est pas possible de donner aux voitures le confortable que le voyageur pourrait y souhaiter.

La plupart de ces graves inconvénients sont évités par l'emploi de la traction mécanique. Avec celle-ci l'effort de traction n'est plus resserré dans d'étroites limites; on peut au contraire le faire varier suivant les besoins dans des proportions considérables et aborder de très fortes rampes sans ralentir outre mesure. Aussi l'exploitation offre-t-elle une souplesse, une élasticité qu'il est impossible d'obtenir de la traction animale. S'il y a afflux momentané de voyageurs, il suffit d'atteler une ou deux voitures en plus à chaque train et d'augmenter la vitesse pour produire rapidement l'écoulement.

La vitesse moyenne sur les profils accidentés pouvant être très notablement augmentée, il en résulte une utilisation meilleure du matériel et du personnel et plus de satisfaction de la part du public, satisfaction qui se traduit presque toujours par une augmentation sensible du trafic et des recettes.

Quant au prix de revient de la voiture-kilomètre, il est en général moindre, alors que le trafic total et les recettes par voiture-kilomètre augmentent.

Usage des Voitures-Automobiles et des Locomotives.

§ 2. — La traction mécanique peut s'opérer par deux moyens:

1° Au moyen de voitures automobiles portant elles-mêmes les organes nécessaires à leur locomotion.

2° Au moyen de petites locomotives remorquant de véritables trains de une, deux ou trois voitures.

Pour faire le choix entre ces deux systèmes il faut s'inspirer de l'importance du trafic et du nombre de départs qu'il y a lieu d'organiser par heure ainsi que des dimensions et de l'activité de circulation des voies où le tramway doit passer: les intervalles entre les départs doivent être calculés d'après la longueur de la

ligne et le parcours moyen du voyageur pour perdre le moins de trafic possible. On comprend aisément, en effet, que pour de longs parcours à effectuer, le voyageur peut attendre sans inconvénient le passage du tramway pendant un certain temps, certain qu'il est de rattraper cette perte de temps par la rapidité avec laquelle le trajet sera effectué. Il en est autrement quand la ligne est courte et le parcours moyen du voyageur faible; une attente un peu longue diminue considérablement la vitesse moyenne du transport et détourne souvent le voyageur de l'usage de la ligne; il est alors de toute nécessité de rappocher les départs pour attirer tout le trafic possible. C'est en général le cas des lignes urbaines à circulation régulière avec des trajets moyens de faible importance. Il se peut alors que le trafic ne soit pas suffisamment grand pour justifier l'emploi de trains de capacité relativement grande et se succédant à intervalles si rappochés. On peut alors adopter l'automobile qui se prête mieux à ce genre de service, qui circule et manœuvre plus aisément dans les voies étroites et encombrées, ralentissant, s'arrêtant et repartant avec une facilité et une souplesse que ne peuvent égaler ni les tramways à traction animale, ni les trains à traction de locomotive séparée.

Tout le poids étant utilisé pour l'adhérence, les automobiles conviennent mieux au service des profils très accidentés et l'action de leurs freins est plus prompte et plus efficace: la voiture est tout à fait dans la main de son conducteur.

Leur capacité est naturellement beaucoup moins grande, mais en cas d'afflux extraordinaire de voyageurs, il est généralement possible d'ajouter une voiture ordinaire à chaque automobile, ce qui double le nombre de places offertes au public.

Toutes choses égales d'ailleurs, le prix de revient de la voiture-kilomètre est plus élevé pour l'automobile que pour le train de plusieurs voitures, par voiture remorquée bien entendu. Mais la capacité offerte au public est mieux utilisée et il en résulte souvent que l'excédent de dépense est compensé par les suppléments de recettes que des départs plus nombreux peuvent assurer à l'exploitation.

Si, au contraire, l'affluence du public est irrégulière, si, d'autre part, la longueur de la ligne et des parcours moyens des voyageurs sont considérables et qu'on puisse espacer davantage les départs, il est préférable d'adopter l'emploi de locomotives auxquelles on fera remorquer suivant l'heure et l'affluence du public une ou plusieurs voitures.

C'est le cas des lignes vicinales, de celles réunissant les villes à leurs banlieues ou allant de la périphérie des grandes villes vers leur centre.

Quand le réseau est mixte, on a souvent avantage, quand on le peut, à combiner les deux systèmes de traction.

Avec l'emploi de locomotives, les frais de traction par voiture remorquée, principalement ceux de main-d'œuvre et de personnel sont moindres, puisqu'un même machiniste et un même conducteur suffisent alors pour plusieurs voitures.

D'un autre côté, la mise en réparation d'une locomotive ou d'une voiture n'immobilise que l'une ou l'autre, tandis que la mise en réparation d'une automobile immobilise l'ensemble complet.

Enfin, le voisinage immédiat des voyageurs avec le moteur est évité, ce qui rend les mouvements plus doux, diminue les chances d'accident et est préféré du public.

Choix du système de traction mécanique à adopter.

§ 3. — Une fois la question tranchée entre l'adoption de l'automobile et celle de la locomotive, le choix se resserre sensiblement et les prescriptions diverses des différentes municipalités viennent le limiter encore plus étroitement.

Les considérations qui doivent guider dans ce choix sont de natures très diverses ; il y a d'abord la question de l'aptitude du système à effectuer régulièrement, sans accidents ni interruptions, le service demandé. Puis vient l'examen de la sécurité qu'il peut offrir soit aux voyageurs, soit d'une manière générale à tout ce qui se trouve sur la voie publique ; on doit tenir compte des oppositions que les riverains ou des tiers quelconques pourraient faire à tel ou tel système en raison des désagréments ou des dommages que son exploitation pourrait leur causer et des difficultés qu'ils pourraient ensuite susciter à la Compagnie exploitante.

Puis vient enfin la grosse question, qui n'est jamais prise en trop sérieuse considération : celle du prix de revient et des résultats économiques.

Sauf quelques exceptions, la plupart des systèmes de traction mécanique possèdent au même degré la faveur du public. Aussi peut-on dire que, dans les mêmes conditions de fréquence, de rapidité et de confortable, le trafic et par suite les recettes seront là peu près indépendants du choix du système ; par conséquent

le plus ou moins de bénéfices donnés par l'exploitation dépendront alors uniquement du prix de revient de la traction (1).

La meilleure base pour comparer entre eux les différents systèmes au point de vue financier, réside dans la comparaison des prix de revient de la voiture-kilomètre, le travail et les autres dépenses de traction variant peu avec le degré de chargement de la voiture, les voitures comparées devant être, bien entendu, de même capacité et de même confort.

Toutefois, ainsi que nous l'avons déjà dit, ces comparaisons sont extrêmement difficiles à établir d'une manière équitable, les prix pour le même système pouvant aisément varier suivant les applications du simple au double par suite des différences dans l'intensité du trafic, dans le prix de la main-d'œuvre et celui des matières premières.

On ne doit pas négliger de faire entrer en ligne de compte l'amortissement des installations fixes et du matériel roulant ; et à bénéfice égal par kilomètre voiture on doit encore tenir compte de l'importance des capitaux de premier établissement à rémunérer dans les différents cas.

Cet examen approfondi permet seul d'apprécier d'une manière définitive l'avantage d'un système de traction mécanique.

Classement des différents systèmes de traction mécanique.

§ 4. — Au point de vue du mode d'emploi de la force motrice, les tramways à traction mécanique peuvent se diviser en deux grandes catégories :

1° Ceux dans lesquels l'énergie est produite dans une usine centrale et est transmise aux appareils récepteurs, sans y être emmagasinée, mais au fur et à mesure de sa consommation en suivant toutes les fluctuations de celle-ci ;

2° Ceux dans lesquels le matériel roulant emporte avec lui une provision d'énergie suffisante à son fonctionnement durant un laps de temps déterminé.

(1) Quand on compare les différents procédés de traction mécanique, on s'attache souvent presque uniquement à la question de rendement, c'est-à-dire à la quantité de combustible brûlé par travail utile. Certes, c'est là un facteur important du prix de revient ; mais il est loin d'être le seul et d'avoir la prépondérance qu'on lui attribue ; dans l'ignorance des autres facteurs quand les systèmes sont encore peu connus, c'est celui que l'on discute le plus. Mais la pratique ne tarde pas à démontrer que ces discussions n'avaient guère qu'un intérêt théorique et que les prix de revient dépendent de conditions beaucoup plus étendues et complexes.

PREMIÈRE PARTIE

TRAMWAYS DE LA PREMIÈRE CATÉGORIE

CHAPITRE PREMIER

Tramways funiculaires.

§ 5. — Les tramways de la première catégorie sont particulièrement en faveur aux États-Unis où ils ont reçu en peu d'années de très nombreuses applications. Mais cet exemple n'a guère été suivi en Europe où, jusqu'à présent du moins, on a paru donner la préférence aux systèmes appartenant au deuxième groupe. Les sytèmes de la première catégorie comprennent principalement :

1° Les tramways funiculaires ou à câble.

2° Les tramways électriques à conducteur le long de la voie.

Tramways funiculaires ou à câble.

§ 6. — Les tramways funiculaires ont été les premiers en date. Mais parmi eux, il y a lieu de faire soigneusement la distinction entre les lignes à câble à « mouvement alternatif » et les lignes à câble à « mouvement continu ».

Les premières sont connues depuis assez longtemps déjà en Europe où elles ont reçu quelques applications spéciales pour l'ascension des hauteurs, alors qu'il s'agissait de racheter de fortes différences de niveau par des lignes courtes et en général rectilignes : telles sont les lignes de Lyon-Fourvières, Lyon-la Croix-Rousse, du Vomero à Naples, etc.

Parfois quand les rampes à escalader se sont trouvées être très

considérables, l'emploi du câble a été combiné avec celui de la crémaillère afin d'avoir un supplément de sécurité en cas de rupture du câble; telles sont les lignes bien connues du Giessbach et de Territet-Glion, en Suisse, lignes dans lesquelles l'inclinaison maximum dépasse de beaucoup le coefficient de frottement des roues sur les rails.

Ces applications toutes spéciales rentrent plutôt dans la catégorie des plans inclinés et ne peuvent être considérées comme constituant de véritables lignes de tramways.

§ 7. — Tout autres sont les lignes établies sur la voie publique, desservies par des câbles animés d'un mouvement continu et dont les États-Unis nous offrent tant d'exemples, appliquées aussi bien à des lignes courtes et escarpées qu'à de longs parcours en terrain plat constituant de véritables réseaux urbains.

Ce système est caractérisé par la présence entre les deux rails, d'un câble mis en mouvement d'une manière continue par une machine motrice placée dans une station fixe; ce câble circule ordinairement dans un caniveau souterrain muni d'une rainure longitudinale, où il est guidé, en ligne droite, par des poulies verticales et en courbe par des poulies horizontales ou obliques. La connexion entre le câble et la voiture se fait au moyen d'un appareil nommé « grip » qui lâche ou serre le câble à volonté en faisant ainsi participer ou non la voiture au mouvement de translation continu de ce dernier.

Ce « grip » est tantôt fixé à la voiture même et tantôt à un truck spécial qui remorque un train d'une ou plusieurs voitures.

§ 8. — Le caniveau où circule le câble constitue une des parties les plus délicates du système. Il a reçu des dispositions variées.

Dans les premières installations à San-Francisco, il était formé de châssis en fonte, reliés aux longrines de rails par des madriers transversaux, et entre eux, à leur partie supérieure, par des poutrelles en fonte ayant la forme d'U et laissant entre elles la rainure longitudinale, parallèle aux rails dont il a été question ci-dessus.

Le surplus des parois du caniveau est constitué, d'abord par des madriers et ensuite par une tôle cintrée formant le fond de ce caniveau.

Une pareille disposition ne donne pas la rigidité transversale

indispensable. Aussi dans les installations plus récentes a-t-on développé en largeur les cadres en fonte de manière à leur faire embrasser les deux rails à leurs extrémités ; ils servent alors de traverses à ces rails et constituent avec la voie un ensemble solide et indéformable. Les parois du caniveau sont formées de madriers reliant les différents cadres; elles sont parfois exécutées en maçonnerie de béton.

Ces dispositions n'ont pas suffi dans les pays à hiver rigoureux où des précautions particulières doivent être prises pour que le froid et les gelées n'amènent pas des contractions de la voie et des resserrements de la fente où passe le grip.

A Birmingham les châssis en acier profilé sont noyés dans un massif en béton où se trouve ménagé le chenal. Les rails et les poutrelles de la rainure sont boulonnés aux châssis et, en outre, reliés entre eux par des entretoises rigides en acier assurant l'invariabilité de leurs distances respectives. Des drains sont ménagés de distance en distance pour l'écoulement à l'égout des eaux du caniveau.

Des dispositions analogues ont été adoptées au funiculaire de Paris-Belleville; mais l'ensemble ne présentait pas une rigidité suffisante et les fortes gelées ont produit des contractions assez sensibles pour amener à plusieurs reprises des arrêts du service; depuis la voie a été beaucoup consolidée.

§ 9. — Le câble, en acier, a en général un diamètre de 25 à 30 *mm*, suivant la longueur et la résistance de la ligne. Il est difficile de dépasser le diamètre de 30 *mm* à cause de la raideur considérable à l'enroulement sur les poulies et les tambours. Il repose dans le caniveau sur des poulies à gorge de formes et de dispositions variables suivant que la voie est en ligne droite ou en courbe et que l'expérience seule permet de déterminer d'une manière exacte : ce n'est souvent qu'après beaucoup de tâtonnements qu'on arrive à donner aux poulies de chaque courbe la forme convenable et, après la forme, l'emplacement exact que doit occuper chacune d'elles de façon que chaque brin retombe toujours sur les poulies correspondantes, quelle que soit la tension du câble; leur profil doit donc être, autant que le permet l'espace disponible, dessiné de manière à permettre le plus d'amplitude possible aux variations du déplacement de ce câble et éviter qu'il ne soit jamais chassé hors de la poulie.

Les câbles pèsent de 2,5 à 3 *kg* le mètre courant, soit 5 à 6 *t*

le kilomètre de voie. Ils sont en général formés d'une âme en chanvre avec des torons en fils d'acier d'une qualité spéciale afin d'être à la fois souples, résistants, faciles à épisser et de longue durée. La bonne fabrication de ces câbles est très difficile à obtenir; elle est cependant d'un intérêt majeur.

Le poids du câble par mètre courant, augmentant avec la longueur des lignes, on voit que cette dernière est bien vite limitée par les poids énormes qu'il acquerrait. Il en est cependant de 10 à 12 000 *m* d'un seul jet pour lesquelles le câble pèse 70 à 80 *t*; mais alors le travail absorbé par son seul mouvement et par les différentes résistances passives est excessif et le rendement est très mauvais. On ne dépasse pas en général 7 à 8 000 *m* et c'est déjà beaucoup pour peu que la ligne présente quelques sinuosités. Par suite de la raideur des câbles, les sinuosités augmentent beaucoup les résistances passives, une courbe de 90° donnant une résistance additionnelle supérieure à celle de 300 *m* de ligne droite.

A l'usine le câble passe d'abord sur de grandes poulies de renvoi qui le dirigent sur la poulie motrice, puis autour de la poulie d'un tendeur destiné à racheter constamment l'allongement que prend le câble et à lui communiquer une tension fixe au départ. L'adhérence à la poulie motrice est assurée par une garniture en cuir tassée au fond de la gorge et par l'effet même du tendeur.

La vitesse de translation varie entre 9 et 15 *km* à l'heure suivant les règlements des villes et les services à effectuer. Cette vitesse est maintenue constante par le régulateur des moteurs à vapeur quel que soit l'effort de traction développé. Cet effort est particulièrement intense au moment du démarrage.

Quand le mécanicien veut mettre en route, il serre le grip. Le câble continue de glisser dans les mâchoires, mais le frottement qu'il exerce et dont l'intensité dépend de l'énergie du serrage, a pour effet d'entraîner la voiture. Le frottement cesse quand le véhicule a pris la même vitesse que le câble; l'expérience montre qu'il acquiert à ce moment sa valeur maxima.

Plus le serrage du « grip » est puissant et plus est rapide le démarrage de la voiture; il peut en résulter des secousses désagréables pour les voyageurs et dangereuses pour la sécurité du câble et des machines motrices. Aussi le mécanicien doit-il apporter une grande attention et un grand soin à cette manœuvre. La durée d'un démarrage varie entre 4 et 8 secondes : dès que

la vitesse normale est obtenue, le grip doit être serré à bloc de manière à rendre la voiture solidaire du câble.

On comprend aisément combien doit être rapide l'usure d'un câble soumis à un pareil traitement, quelle que soit d'ailleurs la qualité des matières dont il est constitué. Il s'allonge également au fur et à mesure de son service jusqu'à augmenter de 1 0/0 de longueur. Pour l'entretenir on l'enduit d'une matière qui le protège contre la rouille et maintienne sa souplesse ; c'est en général du goudron végétal pur ou un mélange de goudron, d'huile végétale ou animale et de suif. Ce graissage doit être modéré afin de ne pas rendre le câble trop glissant, ce qui aurait de grands inconvénients pour l'adhérence au grip et sur les poulies motrices.

§ 10. — A San-Francisco, les exploitations par câble sont appliquées dans des rues en ligne droite présentant des rampes allant jusqu'à 150 et même 170 *mm* par mètre. De pareilles rampes ne permettraient l'emploi d'aucun autre système. Nous citerons notamment l'installation de « Clay-street » ; la ligne a une longueur de 1 650 *m* à double voie; l'écartement des rails est d'environ 1 *m*. Elle présente une rampe continue de 750 *m* s'élevant à une hauteur de 93 *m* au-dessus de l'origine de la ligne.

Le câble de 25 *mm* est actionné à une vitesse de 9 600 *m* à l'heure par deux machines à vapeur de 100 *ch*. Les voitures portent 26 passagers et le truck qui les remorque peut en prendre 18. Le service se fait de cinq en cinq minutes et le trafic, très actif, atteint un mouvement journalier de 3 à 5 000 voyageurs.

A Chicago, les conditions d'exploitation sont toutes différentes. Les voies sont sensiblement horizontales et la vitesse du câble atteint 15 *km* à l'heure. Une machine de 200 *ch* met en mouvement à la fois 43 trains formés chacun d'un truck et de 2 voitures et pouvant porter ensemble 1 900 voyageurs. Le service se fait en toutes saisons d'une manière satisfaisante et attire un trafic très intense.

L'installation de « Birmingham » a une longueur de 4 800 *m* entièrement en double voie avec des rampes atteignant 70 *mm* par mètre. La voie est divisée en deux sections sur lesquelles les vitesses sont respectivement de 11 200 et 14 400 *m* à l'heure. Les câbles pesant 25 *t* sont actionnés par deux machines fixes de 250 *ch* et entraînent des voitures à 42 places munies chacune de leur « grip » et pesant environ 4 000 *kg* à vide. Le service extrêmement chargé et actif se fait avec 20 voitures en semaine et 12 le dimanche; le parcours kilométrique variant de 2 à 3 000 *km* par jour.

§ 11. — D'après la description que nous avons faite de la voie, on comprend aisément que l'emploi d'un pareil système entraîne pour l'établissement de la voie à des frais énormes et qui n'ont de raison d'être que dans l'espérance d'un trafic très considérable.

A San-Francisco le coût d'établissement de la voie se serait élevé à plus de 450 000 *f* le kilomètre, non compris les machines. Les chiffres que nous relevons dans les rares installations européennes sont sensiblement de même ordre.

Prenons par exemple la ligne de « Highgate Hill » à Londres. Sa longueur est de 1 150 *m* dont partie à simple voie, avec des rampes de 20 à 40 *mm* par mètre et nous trouvons pour les frais de premier établissement les chiffres suivants :

Voies complètes avec caniveau, câbles, etc. . . .	317 000 *f*
Machines fixes, chaudières et accessoires.	73 000
Matériel roulant.	60 000

Le nombre de kilomètres trains-moyen est d'environ 3 500 par semaine avec un transport d'environ 16 000 voyageurs.

A Birmingham les dépenses de premier établissement ont été les suivantes :

Voies complètes avec caniveau et câbles, etc. . .	1 530 000 *f*
Machines, chaudières et accessoires	161 000
Matériel roulant (20 voitures équipées).	141 000
Bâtiments, bureaux et divers.	443 000

§ 12. — Paris possède aussi depuis 1891 une ligne de tramway funiculaire restée trop célèbre par les nombreux déboires qui ont accompagné ses débuts et qui ont longtemps excité la verve des chansonniers. Cette ligne à voie unique de 1 *m* possède une longueur de 2 000 *m* entre la place de la République et l'église de Belleville, rachetant une différence de niveau de 61 *m*.

Les rampes atteignent 60 à 75 *mm* par mètre dans la rue de Belleville et le tracé extrêmement sinueux présente de nombreuses courbes et contre-courbes de 21 *m* de rayon qui ont beaucoup augmenté les difficultés d'installation. Les travaux de cette ligne ont été exécutés par la Ville de Paris et les essais ont été suivis de nombreux échecs par suite des difficultés dues à la voie unique, aux nombreuses sinuosités et au manque d'installations similaires

pouvant servir de modèle; la force motrice n'a pas été prévue sur des bases assez larges et il est résulté de toutes ces imperfections de grandes difficultés d'exploitation que la Société anonyme chargée de l'exploiter est arrivée à atténuer peu à peu en grande partie jusqu'à obtenir actuellement un fonctionnement à peu près normal.

La voie a 1 *m* de largeur et se compose de deux rails Broca pesant 30 *kg* le mètre courant et deux rails en Z comprenant la rainure pesant 29,5 *kg* le mètre courant. Les châssis espacés tous les mètres sont scellés dans une fosse en maçonnerie où se déplace le câble.

Les voitures au nombre de douze sont très petites et très légères : elles n'ont que 5 *m* de long sur 1,60 *m* de large, pèsent 3 *t* à vide et peuvent contenir chacune 20 personnes. Elles s'attellent par deux à la fois formant un petit train pouvant offrir 40 places. Deux nouvelles voitures actuellement en construction présenteront des dimensions un peu supérieures et des dispositions plus commodes : elles pourront contenir ensemble 55 voyageurs.

Le « grip » qui a été l'objet de plusieurs modifications heureuses, permet de développer un serrage de 5 000 *kg*.

Les voitures sont munies d'un double système de freins à corde et à patins agissant sur les roues et sur les rails de manière à obtenir un arrêt rapide sur les plus fortes pentes. Le démarrage se fait avec assez de douceur, la voiture prenant en cinq ou six secondes sa vitesse de service qui est de 3 *m* à la seconde.

La puissance développée par les machines fixes est en moyenne de 80 à 90 *ch*; mais elle atteint souvent jusqu'à 160 *ch*, oscillant brusquement dans des limites étendues. Des expériences ont montré que le seul frottement du câble et des poulies absorbait une puissance de 40 à 50 *ch*.

Le câble de 30 *mm* de diamètre pèse un peu plus de 13 *t*, Son usure est relativement très rapide; les trois premiers câbles n'ont guère duré plus de trois à quatre mois, correspondant à 50 ou 60 000 *km*-trains. Le quatrième câble fourni par une maison spéciale anglaise paraît donner meilleure satisfaction et on espère obtenir une durée d'un an.

Le prix de chaque câble dépasse 15 000 *f*.

Les poulies, principalement dans les courbes, s'usent assez rapidement et demandent des remplacements fréquents. Aussi l'entretien de la voie est-il très onéreux.

Les frais de premier établissement ont été les suivants :

Immeubles et dépôts.	200 000 *f*
Voie (2 000 *m*).	723 000
Chaudières, machines et installations fixes. . .	115 000
Matériel roulant (12 voitures).	88 000
Divers	34 000
Dépenses ultérieures environ.	200 000
Total.	1 400 000 *f*

Soit la somme énorme de 700 000 *f* le kilomètre.

Les frais d'exploitation par kilomètre-train de deux voitures ont été les suivants :

(Parcours annuel : 216 000 trains-kilom.)

Personnel de conduite et de l'usine fixe.	0,180 *f*
Combustible, graissage, eau, etc., pour force motrice.	0,272
Entretien de la voie (traction)	0,104
Entretien du matériel roulant	0,169
Total	0,725 *f*

Ces dépenses paraissent susceptibles d'une certaine réduction avec de meilleures conditions de fonctionnement.

§ 13. — Comme comparaison nous donnons ci-après quelques renseignements sur les frais de la traction à Highgate Hill et à Birmingham.

FRAIS DE TRACTION par KILOMÈTRE-VOITURE	HIGHGATE HILL	BIRMINGHAM
	f	*f*
Main-d'œuvre et personnel de conduite . .	0,162	0,091
Combustible, graissage et alimentation. . .	0,090	0,060
Entretien du matériel roulant	0,079	0,109
Totaux (non compris entretien de la voie	0,331	0,260

Ces derniers chiffres paraissent relativement faibles; mais il ne faut pas oublier qu'ils s'appliquent à un trafic très intense, ce qui est une condition d'exploitation avantageuse.

Pour des lignes courtes, rectilignes, remorquant de fortes charges, le rendement du système funiculaire est assez bon. Mais il s'abaisse dès que le trafic diminue ou que la ligne s'allonge. Ainsi dans l'installation de Birmingham où cependant chaque section n'a pas plus de 2 800 *m*, le rendement avec 20 voitures en service est de 65 0/0 environ. Le mouvement du câble absorbe à lui seul plus de 60 *ch*, alors que la puissance nécessaire pour remorquer les 20 voitures chargées n'est que de 130 *ch*.

A San-Francisco le rapport entre la puissance de traction appliquée aux voitures et celle développée aux machines fixes qui était d'environ 35 0/0 a monté à 50 0/0 au fur et à mesure que le trafic augmentait.

A Paris, par suite des sinuosités de la voie, le rendement est plus faible et ne dépasse pas 45 0/0.

Quant à la consommation de combustible, elle est à Birmingham de 2,6 *kg* de houille par kilomètre de voiture, à Highgate Hill d'environ 3 *kg* et à Paris de 3,4 *kg* par kilomètre-train offrant 40 places.

§ 14. — En résumé, la traction par câble est une traction de luxe qui ne peut sous aucun rapport prétendre au bon marché.

Ce système présente quelques inconvénients particuliers; il est excessivement difficile à établir dans de bonnes conditions quand le tracé est sinueux et reste sujet à beaucoup de causes d'accidents qui peuvent interrompre le service. Quand la vitesse du câble est considérable, le démarrage est parfois assez brutal, ce qui peut occasionner des chocs et des accidents. Ils sont parfois assez dangereux dans les rues très fréquentées et sinueuses où ils peuvent être appelés à circuler et leur manœuvre n'est pas aussi souple que celle des tramways ordinaires qui peuvent ralentir ou accélérer leur mouvement à volonté suivant les besoins du moment.

Enfin, et c'est là leur défaut capital, les frais de premier établissement sont énormes et doivent en faire exclure l'emploi de prime abord dans la plupart des cas où un trafic très intense et rémunérateur n'est pas assuré dès les débuts. Il peut toutefois trouver son application rationnelle dans certains cas spéciaux, pour desservir des lignes peu sinueuses, de faible longueur, à grand

trafic, surtout quand des rampes considérables rendent difficile et onéreux l'emploi d'autres systèmes. Ils fournissent alors parfois la seule solution possible.

Pour terminer, nous donnons ci-après quelques chiffres moyens sur les conditions comparatives de fonctionnement de quelques lignes à câble et à traction animale, d'après les rapports lus au meeting de Pittsburg en 1891.

	FRAIS d'établissement par kilomètre de voie	NOMBRE ANNUEL de voitures-kilomètres par kilomètre	NOMBRE DE VOYAGEURS PAR AN		PAR KILOMÈTRE-VOITURE	
			Par kilomètre de ligne	Par kilomètre-voiture	FRAIS d'Exploitation	INTÉRÊT à 6 0/0
Lignes à chevaux .	97 320 *f*	43 345	157 385	3,00	0,76*f*	0,14*f*
Lignes à câbles .	576 800	309 395	847 480	2,74	0,44	0,22

Le trafic nécessaire pour couvrir les frais d'exploitation et réserver 6 0/0 pour l'intérêt et l'amortissement du capital de premier établissement serait de cinq à six fois plus élevé avec les lignes à câble qu'avec celles à traction animale, du moins aux États-Unis.

En Europe où la main-d'œuvre est beaucoup moins chère, où la vitesse tolérée est plus faible, cette proportionnalité serait encore plus grande et moins en faveur de la traction par câble.

Il ne faut pas oublier, en effet, qu'avec les vitesses de 15 *km* admises aux États-Unis, les tramways à câble, de même que les autres systèmes de traction mécanique, permettent à la même voiture d'effectuer par jour un parcours kilométrique moyen beaucoup plus grand qu'avec la traction animale, ce qui donne une meilleure utilisation du personnel et constitue un point très important dans un pays où la main-d'œuvre est aussi chère qu'aux États-Unis.

En septembre 1890, le développement des lignes à câble dans ce dernier pays dépassait 700 *km*, soit 20 0/0 du développement total des lignes de tramways à traction mécanique.

Le système s'est aussi beaucoup répandu en Australie, où il compte plus de 250 *km*.

CHAPITRE II

Tramways électriques.

§ 15. — Ce système de tramways constitue une des plus intéressantes applications de la transmission de la force par l'électricité. Le principe général sur lequel il repose consiste à produire la force motrice dans une usine fixe et à l'y transformer au moyen de dynamos en énergie électrique qui est transmise par des conducteurs placés tout le long de la voie à des récepteurs électriques portés par la voiture elle-même et qui communiquent aux essieux leur mouvement de rotation.

Les tramways électriques diffèrent donc en principe des tramways funiculaires en ce que l'énergie mécanique, au lieu d'être transmise et utilisée sous sa forme primitive, subit auparavant une transformation ; mais cette transformation facilitant beaucoup la transmission donne des avantages qui peuvent compenser amplement la perte qui en résulte et on peut avoir intérêt à l'employer au même point de vue qu'on en a eu souvent à remplacer les câbles télédynamiques par des transmissions électriques ordinaires.

On peut distinguer dans un pareil système trois parties différentes :

1° La ligne assurant la communication électrique entre les voitures et l'usine fixe;

2° La production de l'énergie dans l'usine fixe;

3° Son utilisation dans les voitures.

Nous commencerons par l'étude de la ligne qui est la partie la plus délicate et essentielle du système.

Ligne de transmission.

§ 16. — On rencontre, dès le début, une difficulté spéciale : le récepteur électrique étant en mouvement, le point de prise du courant sur les conducteurs change au fur et à mesure de l'avan-

cement, et il faut cependant assurer constamment une bonne communication entre ces conducteurs et les récepteurs, tout en les isolant soigneusement des corps environnants.

La ligne électrique peut occuper, par rapport à la voie, trois positions différentes. Elle peut être :

Soit aérienne, et placée alors à une forte hauteur au-dessus des rails ;

Soit placée au niveau des rails ;

Soit souterraine, au-dessous du plan de la voie.

Ces trois systèmes ont reçu leurs applications ; mais le premier et le dernier peuvent seuls convenir aux tramways dont la voie n'est pas installée sur une plate-forme spéciale.

Ligne aérienne.

§ 17. — Dans le premier tramway électrique, installé en 1881, par la maison Siemens, les conducteurs étaient aériens et formés par des tubes creux en laiton, munis vers le bas d'une fente longitudinale de 7 à 8 *mm* et pendus à des câbles en fer. Des câbles souples amenaient le courant à l'électro-moteur en prenant contact sur les conducteurs au moyen de deux curseurs circulant intérieurement.

Ce système fut adopté avec quelques variantes par les premières lignes de tramways électriques qui s'installèrent en Europe, dans l'intervalle 1881-1886, et parmi lesquelles on peut citer la ligne de Francfort-Offenbach (1883), et surtout celle de Vevey-Montreux-Chillon, longue de 10.400 *m*.

Dans toutes ces lignes, les conducteurs sont doubles et formés de tubes creux, en acier ou en cuivre, soudés à leurs extrémités. Ils sont suspendus à des haubans métalliques qui ont pour mission de résister aux efforts mécaniques, et les haubans ainsi que les tubes sont supportés au moyen d'isolateurs, par des poteaux plus ou moins espacés ; parfois les haubans ont une âme en cuivre et participent à la conduite du courant. Les appareils capteurs du courant sont toujours des navettes circulant dans les tubes, et parfois pressées contre eux par des ressorts afin d'assurer un contact intime. Nous n'insisterons pas sur ces dispositions ainsi que sur celles plus ou moins ingénieuses adoptées pour les croisements et les aiguillages. Mais on comprend aisément combien un pareil attirail de tubes, de haubans, etc., était dans la plupart des cas

d'un emploi peu pratique et d'un aspect peu favorable. Aussi les difficultés qui en résultaient arrêtèrent-elles l'expansion de la traction électrique dans les villes européennes.

§ 18. — Les Américains cherchèrent à réduire les dimensions apparentes des conducteurs aériens; pour cela, ils eurent l'idée de remplacer les tubes creux par de simples fils métalliques de quelques millimètres de diamètre et les navettes de prise de courant par des roulettes ou « trolleys », ces roulettes étant disposées de manière à tendre constamment à soulever le fil.

Dans les débuts, les doubles fils conducteurs, jugés d'abord nécessaires, furent conservés, nécessitant par suite un double trolley; mais la complication qui en résultait amena bientôt les Américains à supprimer le deuxième fil et à établir tout simplement le retour par la terre, comme dans le cas des lignes téléphoniques et télégraphiques.

Tel est le « overhead single trolley system » employé pour la première fois à Minneapolis, en 1886, et qui, depuis, sous le patronage des Compagnies Sprague et Thomson Houston, a eu une si rapide et brillante carrière.

Les promoteurs ont eu surtout la préoccupation d'atténuer un des principaux inconvénients du système aérien en réduisant à leur plus simple expression, au point de vue de l'aspect et du poids, les parties apparentes de la ligne de transmission électrique et ils ont atteint dans la limite du possible le but qu'ils poursuivaient.

Les fils de trolley ont généralement de 7 à 8 *mm* de diamètre; ils sont très fortement tendus de manière à n'avoir pour des portées de 30 à 50 *m*, qu'une flèche insignifiante de quelques centimètres au plus et à paraître ainsi presque rectilignes.

Leur mode de suspension varie beaucoup.

Parfois quand la voie passe au milieu de la rue, ils sont suspendus au moyen d'isolateurs à des fils transversaux en acier, aussi fortement tendus que possible et fixés eux-mêmes, soit à des appliques scellées dans les murs, soit à des poteaux plantés dans le sol de chaque côté de la voie de communication.

Parfois aussi, quand les rues sont larges et que la voie longe les trottoirs, les fils de trolley sont fixés par des isolateurs à des potences simples ou même doubles quand la voie est elle-même double. Ces poteaux servent aussi à porter, au moyen d'isolateurs, tous les autres fils nécessaires au service de la ligne.

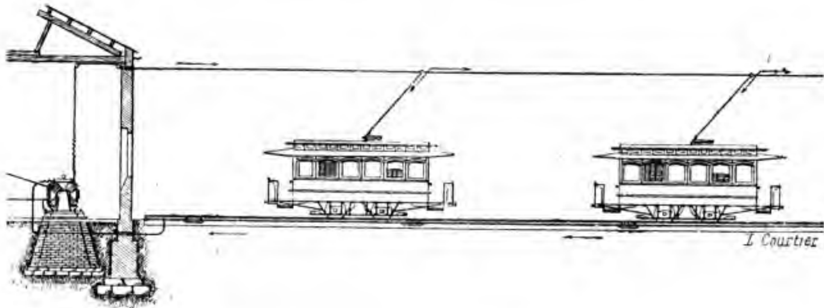
Par suite des grandes tensions des fils, ces poteaux doivent être

très solidement scellés dans le sol ; dans les courbes ils doivent être beaucoup plus rapprochés qu'en alignement droit.

On a ainsi au-dessus de la voie une résille de fils fins très tendus et aussi peu apparents que possible.

La prise de courant s'opère au moyen d'une poulie à gorge profonde maintenue au bout d'une perche métallique articulée à ressort sur le toit de la voiture, et qui tend à soulever le fil en l'allégeant d'une partie de son poids ; la très forte tension du fil et la pression du ressort asssurent un contact très intime avec le galet et empêchent celui-ci de dérailler. L'usure de ce galet est assez rapide.

Un des pôles de la dynamo génératrice est relié au fil de trolley, l'autre au rail, de telle sorte que le courant suit la marche suivante : le fil de trolley, le galet, la perche, le régulateur de vitesse, le moteur électrique, les roues et les rails, d'où il fait retour à l'usine.



Ce système est maintenant le plus généralement adopté, et aussitôt après son apparition il a pris une extension extraordinaire aux États-Unis, où de 1886 à 1893 il a été installé plus de 6 000 *km* de voies d'après ces principes. Depuis deux ans, il a pénétré en Europe, où il commence à faire d'assez rapides progrès quoiqu'il soit loin d'être accueilli avec la même faveur.

Lignes au niveau des rails.

§ 19. — Dans quelques lignes tenant plutôt du petit chemin de fer que du tramway véritable, lignes établies sur une plate-forme spéciale avec rails saillants, on a pu mettre les conducteurs électriques au niveau de ces derniers ; ces conducteurs sont formés

en général d'U en acier doux ou d'un autre métal bon conducteur et sont supportés par des isolateurs un peu au-dessus de la voie.

La prise de courant s'effectue alors au moyen de brosses métalliques ou de sabots en fonte.

Parmi ces lignes spéciales, nous pouvons citer particulièrement celle de « Portrush » en Irlande, longue de 13 800 *m* et fonctionnant à l'aide d'une chute d'eau, celle souterraine du City and South London, et enfin la ligne aérienne de Liverpool.

Lignes souterraines.

§ 20. — Les inconvénients de divers ordres que présentent les lignes aériennes ont fait chercher à plusieurs reprises à les remplacer par des lignes souterraines. Il se produit, pour cette application de l'électricité, la même évolution que pour l'industrie de l'éclairage où les conducteurs à lumière d'abord aériens ont été partout remplacés par des conducteurs souterrains malgré l'énorme augmentation qui en est résultée dans les frais de premier établissement et d'entretien. Mais dans le cas de la traction mécanique des tramways, les difficultés sont bien plus grandes et ce problème n'a guère reçu de solution entièrement satisfaisante jusqu'à ce jour.

Il serait trop long d'énumérer toutes les tentatives diverses qui ont été faites, principalement aux États-Unis, et dont finalement aucune n'a réussi malgré les dispositions ingénieuses des inventeurs.

Les deux seules applications de ce système fonctionnant régulièrement ont été faites en Europe : la première à Blackpool, en Angleterre, et la deuxième à Buda-Pesth.

A Blackpool, le chenal est établi dans l'axe de la voie et présente beaucoup d'analogie avec celui des tramways funiculaires, sauf qu'il n'a pas eu besoin d'être aussi solidement constitué. Il est constitué par des châssis en fonte reliés par des longrines en fonte et bois, formant caniveau. Le courant, amené par deux conducteurs, est capté par un appareil spécial et fait retour par les rails après avoir traversé les moteurs.

L'installation de Buda-Pesth, qui se développe sur une étendue de 11 *km*, est particulièrement intéressante. Cette fois, le chenal se trouve sur l'un des côtés de la voie, son axe coïncidant avec celui d'une des files de rails. La voie analogue à la voie Marsillon est constituée par un ensemble de rails avec contrerails laissant

entre eux une fente longitudinale par laquelle passe l'appareil capteur du courant.

Les rails, solidement entretoisés entre eux sont assemblés à des cadres en fonte distants de 1,20 *m*, et ceux-ci sont reliés entre eux par une maçonnerie soigneusement exécutée et formant les parois du chenal. L'ensemble est solidement installé et s'est bien maintenu.

Les conducteurs sont formés de deux cornières fixées aux cadres par des isolateurs. Le courant est capté par des curseurs s'emboîtant dans ces cornières. Le retour à l'usine par les rails n'a pas été toléré (1). Cette voie, qui a d'ailleurs coûté fort cher, a bien fonctionné jusqu'à présent et donné toute satisfaction.

Toutefois, l'exemple n'a pas été encore imité dans aucune ville d'Europe, par suite des trop grands frais d'établissement et de l'aléa que l'entretien pourrait donner.

Production de l'énergie dans l'usine centrale.

§ 21. — L'installation fixe à l'usine centrale comporte :

1° Les générateurs et moteurs à vapeur ou les récepteurs hydrauliques destinés à produire la force motrice ;

2° Les machines dynamos qui la transforment en énergie électrique ;

3° Les appareils servant au réglage et au contrôle du courant électrique.

La puissance motrice de l'usine dépend principalement des dimensions et du nombre de voitures mises à la fois en service.

Quand le profil de la ligne est accidenté, le travail absorbé par chaque véhicule varie à chaque instant dans d'énormes proportions, la résistance sur une rampe de 6 0/0 étant sept fois plus forte que celle en palier sur une voie ordinaire ; d'autre part, les voitures en service ralentissent, s'arrêtent ou repartent suivant les besoins de l'exploitation, produisant ainsi de brusques changements dans la quantité de courant consommé. Ces variations ont leur contre-coup à l'usine centrale qui doit développer à

(1) Le chenal est en communication tous les 50 *m* avec l'égout pour l'écoulement des eaux pluviales : son nettoyage se fait tous les matins au moyen d'hérissons mobiles qui repoussent la boue, les saletés et la poussière jusqu'en des points fixes munis de regards par lesquels se fait l'enlèvement de ces matières.

chaque instant une puissance proportionnelle à la somme des puissances absorbées par chaque voiture placée dans le circuit.

Ce dernier fait se présente aussi pour les tramways funiculaires; mais avec ceux-ci, les variations sont rendues moins sensibles par la grande importance relative des résistances passives produites par le mouvement du câble, et dont la valeur est à peu près indépendante du travail utile consommé.

Avec les tramways électriques il n'en est pas de même et quand le nombre de voitures en service est faible, on constate des fluctuations excessives dans la consommation d'énergie électrique.

Les diagrammes d'ampèremètres enregistreurs montrent alors qu'avec moins de huit voitures en service, et une ligne un peu accidentée, le travail maximum peut atteindre et dépasser le double du travail moyen.

Les moteurs et les dynamos doivent donc être établis très solidement pour résister à ces brusques soubresauts de puissance.

La distribution du courant aux voitures se fait en dérivation, avec un potentiel à peu près constant aux bornes des électro-moteurs; par contre le courant suit les fluctuations de la force motrice et son intensité varie d'un instant à l'autre dans des limites excessivement étendues; il n'est pas rare de le voir passer brusquement de 0 à 150 ampères.

Aussi, pour obtenir la constance de la force électromotrice aux bornes des génératrices, ou de préférence aux bornes des réceptrices, on est obligé de munir les inducteurs des dynamos d'un double enroulement en série et en dérivation de manière à augmenter le champ magnétique au fur et à mesure que le débit augmente et que s'accroît en même temps la chute de potentiel dans l'induit et dans la ligne. On dit alors que les dynamos sont hypercompoundées.

La tension généralement adoptée est de 500 volts et l'on admet une perte d'environ 10 0/0 dans la ligne. En conséquence on établit les dynamos génératrices pour donner aux bornes 500 volts à vide et 550 volts au débit maximum.

§ 22. — Pour que l'enroulement « Compound » donne de bons résultats, il faut que la vitesse de la dynamo soit maintenue absolument constante, quelle que soit la charge; par suite les moteurs doivent être munis de régulateurs de vitesse très sensibles, permettant de réprimer tout écart de vitesse supérieur à 2 ou 3 0/0.

On arrive en général à maintenir suffisamment constante, pour les besoins du service, la force électromotrice aux bornes des récepteurs; mais il n'est pas possible d'obtenir assez de fixité pour permettre la charge d'accumulateurs.

Quand les variations de la puissance motrice sont considérables et telles, par exemple, que la puissance maxima puisse rapidement dépasser le double de la puissance moyenne, il est préférable d'adopter des machines à grande vitesse, munies de très lourds volants, actionnant les dynamos par courroies ou même directement. La régulation se fait alors d'une manière plus rapide.

Quand la demande de puissance varie plus régulièrement on peut adopter des machines à marche plus lente et plus économique.

Les idées sont d'ailleurs aussi partagées à ce sujet pour la traction des tramways que pour les installations d'éclairage électrique.

En France, on préfère les Sulzer ou les Corliss, tandis qu'en Angleterre et surtout en Amérique on donne la préférence aux machines à grande vitesse qui s'y construisent sur une très vaste échelle : machines Willans, Mac-Intosh, Westinghouse, Armington et Sims, etc.

§ 23. — L'angle de calage des balais reste immuable quelle que soit la charge. Pour atténuer les étincelles qui en résulteraient au collecteur, on adopte des balais en charbon et on dispose l'excitation de manière à presque saturer le champ magnétique et à le rendre insensible à la réaction de l'induit.

Chaque voiture de 50 places, pesant en charge environ 10 *t*, en service sur une ligne bien installée, absorbe en palier, à une vitesse de 10 à 12 *km* à l'heure, de 6 500 à 7 000 vatts, ce qui correspond en moyenne, avec des déclivités modérées, à un travail de 11 à 12 *ch* à l'usine. Mais la puissance de celle-ci doit être prévue assez élastique pour pouvoir fournir à un moment donné jusqu'à 20 ou 25 *ch* par voiture en service.

La Compagnie Thomson-Houston compte en général :

1 dynamo de 60 kilowatts pour 4 voitures en service;

1 dynamo de 100 kilowatts pour 7 voitures en service, soit de 13 à 15 000 watts par véhicule en circulation.

Pour les générateurs de vapeur, 12 m^2 par voiture en service sont largement suffisants.

§ 24. — Quand le réseau est peu étendu on peut l'alimenter directement de l'usine. Mais dès qu'il s'allonge, on est obligé, pour éviter une trop grande perte et pour ne pas avoir à donner une trop forte section au fil de trolley, de l'alimenter en différents points judicieusement choisis au moyen de feeders allant directement de l'usine au réseau et dont le rôle est tout à fait analogue à celui des feeders des canalisations à lumière.

Parfois même la ligne est sectionnée en plusieurs tronçons alimentés chacun par leur feeder, la résistance de chaque feeder étant calculée de manière à avoir la même chute de potentiel en tous les points d'alimentation.

On arrive ainsi à desservir de très vastes réseaux avec un fil de trolley de 8 à 9 *mm* de diamètre.

Quand la consommation de courant est très grande, afin de ne pas multiplier outre mesure le nombre des feeders, on soulage parfois le fil de trolley au moyen d'un conducteur souterrain de forte section, qui lui est relié de distance en distance.

Les dynamos génératrices, quand il y en a plusieurs, sont couplées en quantité sur la ligne. Cet accouplement est assez délicat à effectuer par suite des forces électromotrices élevées mises en jeu. Chaque dynamo peut aussi alimenter une section séparée du réseau.

Les tableaux de distribution portent tous les appareils permettant d'effectuer les accouplements, de régler, contrôler et mesurer les forces électromotrices et les courants produits et d'assurer la sécurité de l'installation.

Parfois le courant électrique est fourni par une station centrale déjà existante et distribuant la force et la lumière dans la ville. Une pareille combinaison est très avantageuse, car elle donne une bien meilleure utilisation pendant la journée du matériel et du personnel de cette station centrale, ce qui lui permet de fournir le kilowatt à très bas prix.

La tension des dynamos à lumière étant généralement beaucoup trop faible, on doit employer des transformateurs à courant continu permettant de passer des tensions de 125 ou 250 volts employées dans les canalisations alimentant les lampes à incandescence aux tensions de 5 à 600 volts employées pour la traction des tramways. Ces transformateurs peuvent d'ailleurs s'installer en dehors de la station centrale et en tels points du réseau qui seront trouvés le plus favorables.

Utilisation de la force motrice aux voitures.

§ 25. — Chaque voiture porte les moteurs électriques nécessaires à son déplacement. Ces moteurs ne sont autre chose que des dynamos d'une construction spéciale pour les approprier au service qu'elles doivent effectuer.

Le courant passe du rail dans les roues, puis dans les rhéostats de réglage et les appareils de sécurité : coupe-circuit, para-foudre, etc., enfin dans les induits des moteurs, la perche, le trolley et le fil.

Quand les connexions à l'usine centrale sont renversées, il suit la marche inverse. Le sens de ces connexions n'est pas indifférent, ainsi que nous le verrons plus loin.

La différence de potentiel est maintenue à peu près constante aux bornes des moteurs au moyen des dispositions que nous avons passées en revue, de telle sorte que c'est l'intensité du courant qui varie suivant la puissance absorbée.

§ 26. — On sait que le couple moteur développé dans l'induit d'une réceptrice se déplaçant dans un champ magnétique H, par un courant d'intensité i, est proportionnel au produit Hi, de telle sorte que l'on a : $$C = KHi. \qquad (1)$$

D'autre part, si l'on désigne par :

E, la différence de potentiel dans la ligne ;

ε, la force contre-électromotrice développée dans la réceptrice ;

R, la résistance du circuit ;

On a la relation : $$\varepsilon = E - Ri \qquad (2)$$

Enfin la force contre-électromotrice ε est proportionnelle au champ magnétique H et à la vitesse ω de rotation de l'induit.

Par suite : $$\varepsilon = \lambda H \omega \qquad (3)$$

Il y a évidemment intérêt à ce que la vitesse de la voiture qui est proportionnelle à ω soit aussi peu affectée que possible par les accidents du profil, ou en d'autres termes que la vitesse de rotation ω varie peu avec la résistance à vaincre.

§ 27. — Deux cas peuvent se présenter :

1° Le moteur est excité en dérivation.

Dans ce cas le champ magnétique est à peu près constant, sur-

tout quand il est presque saturé, parce qu'alors la réaction de l'induit n'a qu'une influence négligeable.

La force électromotrice $\varepsilon = E - Ri$ diminue au fur et à mesure que le courant augmente; mais si la résistance intérieure du moteur est suffisamment faible, la diminution de ε est faible également, par rapport à la valeur de E.

Dans ce cas la vitesse de rotation $\omega = \frac{\varepsilon}{\lambda H} = \frac{E - Ri}{\lambda H}$ est presque constante et l'allure de la voiture se conservera à peu près la même quels que soient les accidents du profil.

Par contre l'intensité du courant $i = \frac{C}{KH}$ augmentera proportionnellement à la résistance du profil et sur de très fortes rampes il pourrait atteindre des valeurs excessives et incompatibles avec la sécurité du moteur à moins de donner à celui ci des dimensions et un poids hors de rapport avec le travail moyen à effectuer.

Aussi n'adopte-t-on presque jamais cette disposition. On préfère avoir les moyens d'augmenter les deux facteurs H et i dont dépend l'effort statique afin de pouvoir développer une grande puissance au démarrage et sur les fortes rampes sans que le courant dans l'induit atteigne des valeurs exagérées. De plus, avec les fortes tensions employées, l'enroulement en dérivation nécessiterait sur les électros un fil très long, très fin et d'un bobinage délicat et coûteux.

Nous remarquerons en passant que ces considérations n'auraient pas la même valeur pour les lignes à résistance régulière comme les lignes des grands chemins de fer et que l'on pourrait alors avoir grand intérêt à conserver le champ magnétique constant, soit par une excitation en dérivation, soit par une excitation indépendante. Cette dernière disposition, en particulier, a été employée par M. Heilmann dans sa locomotive électrique.

§ **28.** — 2° Le moteur est excité en série.

Le couple $C = kHi$ peut alors atteindre la plus grande valeur possible, ce qui assure un démarrage facile et rapide sur les plus fortes rampes.

Pour ne pas avoir de trop grandes variations dans les vitesses en marche normale et pour atténuer la réaction de l'induit, l'enroulement sur les inducteurs est déterminé de manière à produire un champ magnétique très puissant et presque saturé pour l'intensité moyenne du courant. L'angle de calage des balais peut alors

être réduit à zéro, sans qu'il se produise trop d'étincelles au collecteur. De plus, cette disposition rend la force contre-électromotrice développée dans l'induit beaucoup moins sensible aux variations du courant.

On a toujours : $$\omega = \frac{E - Ri}{\lambda H}.$$

La vitesse ω dépend de l'intensité du courant. En effet, quand i augmente, le numérateur diminue, tandis que le dénominateur augmente. Pour cette double raison, la vitesse ira en diminuant au fur et à mesure que l'intensité du courant augmentera, c'est-à-dire au fur et à mesure que la résistance de la ligne nécessitera un effort de traction et un couple moteur C plus grands. Remarquons d'ailleurs qu'on est, dans une certaine mesure, maître d'accentuer ou de réduire ces variations en modifiant la résistance intérieure R au moyen d'un rhéostat intercalé dans le circuit.

Quand la résistance du profil diminue beaucoup, l'effort de traction, le couple C et le courant i tendent tous trois à s'annuler. Alors le champ magnétique diminue très rapidement et la vitesse ω tendrait à s'accroître d'une manière exagérée.

Le rhéostat de réglage permet de limiter cet accroissement de vitesse en augmentant R et réduisant ainsi la force électromotrice aux bornes du moteur. Toutefois, il y a lieu de remarquer que cette manière de faire entraîne une perte qui peut être relativement considérable, et sur certains profils diminuerait beaucoup le rendement moyen.

Remarquons enfin que le rendement électrique du moteur est :

$$\rho = \frac{\varepsilon}{E} = \frac{\lambda H \omega}{E}.$$

Ce rendement dépend beaucoup de la vitesse de rotation ω, car le champ magnétique H ne peut croître au delà de toutes limites ; il y a, au contraire, une valeur qu'il ne peut dépasser quelle que soit l'intensité du courant.

Par suite, aux démarrages où la vitesse de rotation ω est presque nulle, et aux points où les besoins du service nécessitent un ralentissement marqué, le rendement ρ est très faible. Il en résulte une perte à chaque arrêt et à chaque ralentissement, indépendamment de la perte de la force vive absorbée par les freins, et la somme de ces pertes cumulées peut atteindre une importance considérable sur les lignes de tramways à arrêts fréquents et diminuer sensiblement le rendement moyen du moteur.

Des expériences intéressantes ont été faites par M. Siemens sur une petite ligne d'essai de 300 *m* environ pour étudier les variations de puissance absorbée sur différents profils et les modifications du rendement à différentes allures. Les résultats trouvés sont consignés dans le tableau suivant : nous devons dire, toutefois, que les rendements mentionnés nous paraissent bien élevés pour être exacts.

Des expériences faites sur les locomotives électriques du *City and South of London* auraient donné pour résultats un rendement de 87 0/0 à la vitesse de 32 *km* à l'heure et de 43 0/0 à la vitesse de 8 *km*.

Le tableau ci-après montre aussi qu'avec des moteurs excités en série, l'intensité du courant est loin d'augmenter proportionnellement à l'effort de traction.

Quand cet effort varie de 101 à 508 *kg*, l'intensité passe de 26 à seulement 68 ampères.

EXPÉRIENCES	I	II	III
Poids de la voiture à vide	4 200 *kg*	4 200 *kg*	4 200 *kg*
— — chargée	6 735 *kg*	4 575 *kg*	4 575 *kg*
Longueur de la voie d'essai	312 *m*	30 *m*	30 *m*
Rampe	0	53 *mm*	96 *mm*
Coefficient de traction en palier	15 *kg*	15 *kg*	15 *kg*
— — total	15 *kg*	68 *kg*	111 *kg*
Effort de traction en kilos	101 *kg*	310 *kg*	508 *kg*
Durée du parcours	51″	8″	14″
Vitesse en mètres par seconde	6,12 *m*	3,75 *m*	2,14 *m*
— en kilomètres à l'heure	22 *km*	13,50 *km*	7,70 *km*
— angulaire de l'induit	549 *t*	337 *t*	192 *t*
— — des roues	195 *t*	119,5 *t*	68 *t*
Différence de potentiel aux bornes	282,5 *v*	266 *v*	260 *v*
Intensité du courant	26 *a*	54 *a*	68 *a*
Puissance en watts	7 345	14 364	17 680
Puissance mécanique en chevaux	8,25	15,50	14,50
Rendement du moteur	82,5 0/0	79,4 0/0	60,4 0/0
Pertes	17,5 0/0	20,6 0/0	39,6 0/0

§ 29. — Les voitures de tramways portent tantôt un seul et tantôt deux moteurs, suivant les conditions du profil et de l'exploitation.

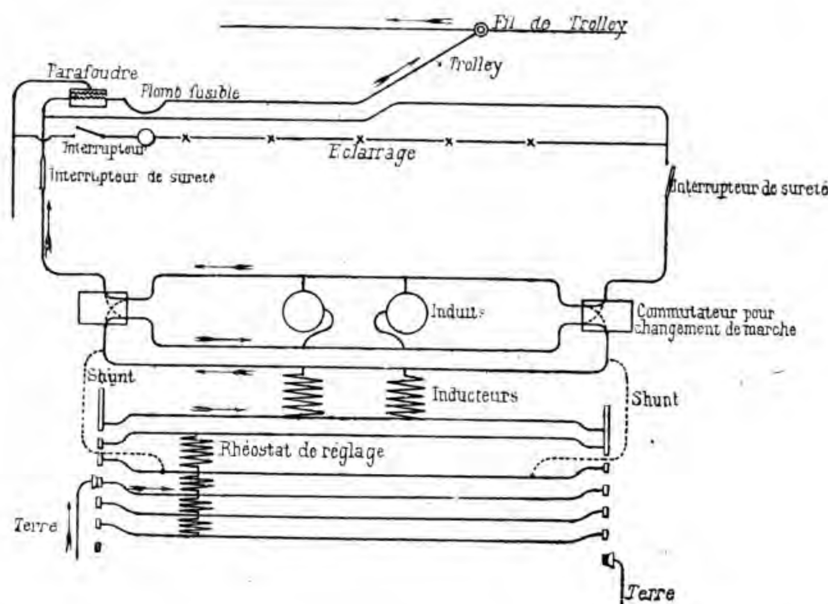
Quand tout le poids adhérent doit être utilisé à un moment donné, soit pour escalader une forte rampe, soit pour remorquer

une forte charge, on préfère, plutôt que d'accoupler mécaniquement les deux essieux, les munir chacun d'un moteur électrique. Cette disposition est évidemment plus coûteuse et augmente le poids mort et l'entretien. Mais elle donne plus de sécurité en cas d'accident arrivant à l'un des moteurs, plus d'élasticité et de facilités pour le réglage, car on est libre de fonctionner avec un seul ou avec l'ensemble des deux moteurs.

Nous donnons ci-après un schéma des connexions établies entre les moteurs électriques des tramways de Marseille dont l'installation a été faite par MM. Sautter et Harlé en 1891.

Les deux moteurs sont excités en série et accouplés en quantité. Le réglage se fait au moyen d'une résistance variable intercalée dans le circuit. Pour augmenter la vitesse en palier, on peut « shunter » les inducteurs, de manière à affaiblir le champ magnétique.

Dans le système Thomson-Houston, les deux moteurs peuvent s'accoupler en série afin de réduire les pertes pendant les démar-



rages. Ils peuvent aussi s'accoupler en quantité pour la marche normale ou être mis par moitié hors circuit quand la résistance à vaincre est faible. L'échelle de réglage est donc très étendue et

permet de faire varier dans de grandes limites la valeur du couple moteur.

Les connexions qui peuvent être établies sont les suivantes :

1° Les deux moteurs sont en série avec une résistance variable dans le circuit (c'est la position du démarrage) ;

2° L'un des moteurs est mis hors circuit ;

3° Le moteur resté dans le circuit a son champ magnétique shunté ;

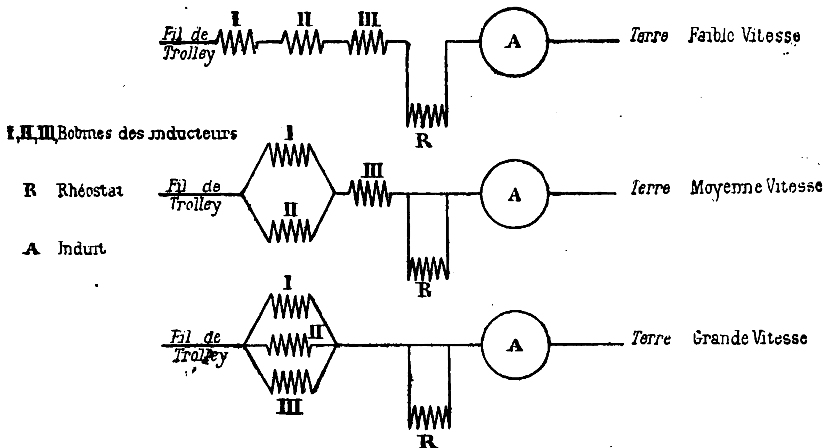
4° Les deux moteurs sont accouplés en parallèle ;

5° Le champ magnétique de ces deux moteurs est shunté.

Ces différentes connexions permettent d'aborder dans de bonnes conditions tous les accidents de profil et d'augmenter la vitesse en palier à volonté. Elles permettent donc de satisfaire à tous les besoins de la pratique.

Sur les longues pentes, on peut séparer les moteurs de la ligne et les mettre en court circuit l'un sur l'autre avec une résistance intercalée. On constitue ainsi un frein électrique agissant avec beaucoup de puissance et de douceur.

En renversant le sens du courant dans l'induit ou dans les in-



ducteurs, on peut arrêter la voiture sur la pente la plus raide et la faire repartir aussitôt en sens opposé.

Dans les moteurs, système Sprague, construits en France par la

Compagnie de Fives-Lille, la régulation se fait d'une autre façon qui laisse plus d'indépendance au fonctionnement des deux moteurs.

L'enroulement des inducteurs comprend trois bobines que l'on peut associer en série, ou en quantité, ou par deux en quantité sur la troisième en série, ou mettre hors circuit, etc., de manière à réaliser toutes les variations possibles du champ magnétique.

Les deux moteurs sont presque toujours couplés en quantité, sauf aux démarrages.

Le rhéostat n'est, autant que possible, pas utilisé; il l'est seulement aux démarrages ou bien sur les longues pentes quand on fait fonctionner les moteurs en dynamos pour former frein.

§ 30. — On dispose les moteurs des tramways de manière à protéger autant que possible leurs organes contre la poussière, la boue et l'eau; en général, l'induit est enfermé dans une boîte en fonte qui fait partie du circuit magnétique et protège complètement les parties délicates de toute cause d'avaries, ce qui réduit considérablement les frais d'entretien et augmente la durée des appareils. Dans ce genre, on peut citer notamment les moteurs Thomson-Houston du type « Water-proof » bien connu et dont nous donnons quelques dispositions. Les inducteurs bipolaires sont excités soit par deux, soit même par une seule bobine. Les balais en charbon sont calés à 90° afin de se prêter aussi bien à la marche avant qu'à la marche arrière; aucun décalage n'est donc prévu pour la réaction de l'induit.

Les moteurs Sprague construits par la Compagnie de Fives-Lille présentent des dispositions analogues; mais la carcasse est établie de manière à éviter toute interruption du circuit magnétique : elle est accessible par le côté au lieu de s'ouvrir par le dessus. Cette disposition est plus avantageuse au point de vue de la résistance du circuit magnétique que celle adoptée par la Compagnie Thomson-Houston.

§ 31. — La vitesse de rotation considérable des moteurs électriques nécessite une transmission de mouvement pour la commande des essieux. Les chaînes de Galle parfois employées n'ont pas donné satisfaction. On préfère obtenir la réduction de vitesse au moyen d'un train d'engrenages.

On a d'abord employé des moteurs à grande vitesse avec une double paire d'engrenages et pignons, c'est-à-dire une double

réduction; tels étaient les trucks de tramways exposés en 1889 à Paris par la Compagnie Thomson-Houston.

Mais un pareil dispositif absorbe beaucoup de puissance par frottement et donne beaucoup d'ennuis par l'usure rapide des pièces et les avaries rendues fréquentes par le grand nombre d'organes intermédiaires (chaque voiture portant 4 pignons et 4 roues d'engrenage). On s'est trouvé amené à simplifier la transmission en la réduisant pour chaque moteur à un seul engrenage calé sur l'essieu et un seul pignon sur l'axe de l'induit. C'est ce type dénommé « single reduction motor » qui a supplanté définitivement le « double reduction motor ». La carcasse du moteur est fixée d'une part au châssis de la voiture par l'intermédiaire de ressorts et d'autre part à l'essieu moteur. Les engrenages sont plongés dans un bain d'huile qui atténue les frottements. Cette disposition a obligé d'adopter des moteurs à marche plus lente, ce qui est un désavantage au point de vue du poids et du rendement proprement dit de ces moteurs. La vitesse ne dépasse pas alors 500 à 550 tours pour des moteurs de 15 à 20 *ch*.

Cette disposition diminue beaucoup les chances d'avarie. Il arrive toutefois encore assez fréquemment des mises hors de service par suite de ruptures de dents d'engrenage; aussi y a-t-il une certaine tendance à supprimer tout mécanisme intermédiaire entre l'essieu et l'électromoteur et à actionner le premier directement par le second. C'est le « gearless motor ». L'induit n'est pas calé sur l'essieu même, mais sur un arbre creux où ce dernier s'enfile et qui est rattaché par de forts ressorts aux roues; les inducteurs reliés au bâti reposent par coussinets sur l'arbre creux. Toutefois des essais précis ont démontré que la suppression des pertes par frottement était amplement compensée par un très notable abaissement du rendement corrélatif de la diminution de vitesse du moteur; aux démarrages et aux ralentissements, les pertes que nous avons signalées plus haut deviennent encore bien plus sensibles, le poids est beaucoup plus considérable, de telle sorte qu'on ne peut encore rien conclure sur les avantages relatifs des deux dispositions. Nous pouvons seulement constater que la disposition à action directe a été adoptée pour la locomotive Heilmann, pour les locomotives du tramway souterrain du « City and South London Railway » et pour les voitures électriques du chemin de fer aérien de Liverpool.

Rendement et consommation de combustible.

§ 32. — Aucune question n'a peut-être été autant discutée que celle du rendement des transmissions électriques et toutes les opinions ont cours à ce sujet.

Le cas qui nous intéresse est plus spécial ; il s'agit du rendement des transmissions électriques appliquées à la traction mécanique des tramways, et tout d'abord, il est facile de se rendre compte que ce cas spécial est un des plus défavorables par suite des mauvaises conditions dans lesquelles s'effectue forcément la transmission.

Il ne s'agit pas ici, en effet, de la transmission d'une puissance constante à un moteur fixe, pour laquelle on peut tout disposer à loisir dans le but d'obtenir le maximum d'effet utile.

La puissance à transmettre varie à chaque instant dans d'énormes proportions entraînant des variations correspondantes dans le régime des dynamos et des moteurs; la distribution de vapeur est pour ainsi dire modifiée à chaque coup de piston. Il en est de même du débit des dynamos génératrices et l'allure de ces deux machines se trouve constamment écartée de leur point de marche le plus favorable. Aussi le fonctionnement de l'Usine centrale ne peut être très économique et les pertes qui en résultent sont plus sensibles qu'on ne l'imaginerait au premier abord.

La consommation de combustible n'y descend guère au-dessous de 1,75 *kg* par cheval électrique disponible aux bornes des dynamos quand les conditions de fonctionnement sont excellentes et elle est souvent bien supérieure à ce chiffre.

La transmission du courant par la ligne peut se faire sans trop grandes pertes si l'isolement de cette ligne est parfait. Dans ce cas, la perte peut être réduite à environ 10 0/0. Mais il n'en est plus de même dès que l'isolement du réseau laisse à désirer. Le moindre défaut est d'autant plus grave que le retour se faisant par la terre et non par une ligne isolée, un seul point faible suffit à produire des pertes de courant considérables. Aussi l'isolement de la ligne à la terre doit-il être l'objet d'une surveillance active et de mesures fréquentes. L'isolement des lignes aériennes se conserve en général très bien.

Quant aux moteurs de tramways, ils ne sont évidemment pas étudiés et combinés pour donner le meilleur rendement, mais bien

plutôt pour être robustes, légers, d'un entretien facile et d'un emploi pratique.

Leur rendement à pleine charge atteint en général 70 à 75 0/0, tandis qu'on fait maintenant d'une manière courante des dynamos rendant 90 0/0.

Aux autres allures le rendement est sensiblement moindre.

En outre ces moteurs fonctionnent dans des conditions encore bien plus défavorables que les dynamos génératrices; les fluctuations du courant y sont encore bien plus sensibles, leur vitesse varie à chaque instant et les ralentissements et démarrages sont la cause de pertes importantes.

Pour ces différentes raisons le rendement final de la transmission est toujours faible et il ne faut pas accorder la moindre créance aux chiffres élevés que les intéressés mettent parfois en avant. Tandis que l'on peut obtenir 65 et même 70 0/0 dans des transmissions électriques à postes fixes, des mesures précises effectuées aux États-Unis n'ont pas donné plus de 0,30 à 0,40 pour le rapport entre le travail recueilli aux jantes des roues et celui indiqué dans les cylindres à vapeur; on a souvent même eu beaucoup moins quand les conditions de la transmission laissaient à désirer.

Des mesures précises faites à Milan ont abouti à la constatation d'un rendement de 50 0/0 seulement entre la puissance *électrique* dépensée à l'usine et la puissance mécanique utilisée sur l'arbre des moteurs électriques, ce chiffre de 50 0/0 ne comdrenant pas, bien entendu, le rendement de l'ensemble moteur à vapeur et dynamo à l'usine fixe.

Une voiture de 28 places pesant 5 600 *kg* à vide absorbe en moyenne 2 millions watts par kilomètre. Les mesures ont été faites avec 10 voitures en service.

D'autres expériences faites par la Compagnie de Fives-Lille sur les moteurs de tramways qu'elle construit ont donné des résultats de même ordre.

Les moteurs expérimentés étaient des moteurs de 8 kilowatts s'appliquant à des voitures de 28 à 32 places pesant 7 à 8 *t* en ordre de service.

Les résultats consignés dans les tableaux ci-joints donnent les rendements et les puissances absorbées à différentes allures et dans différentes conditions de fonctionnement.

EXPÉRIENCES FAITES PAR LA COMPAGNIE DE FIVES-LILLE

Sur une voiture automotrice de vingt-huit places à deux moteurs de huit kilowatts.

COUPLAGE des BOBINES INDUCTRICES	RAMPES 0/00		VITESSES		NOMBRE de tours de la roue	COURANT absorbé en ampères	PUISSANCE en chevaux	RENDEMENT y compris engrenage
	1 voiture automotrice	1 automobile et 1 voiture attelée	en mètres par seconde	en kilomètres à l'heure				
Les trois en série.	— 7,5	— 10,3	3,4	12,2	84	8	2,7	50 °/₀
	+ 6,1	— 2	2,7	9,7	66	16	6	55
	+ 21,5	+ 7,5	2,1	7,5	51	24	8	49
Deux en quantité sur la troisième en série.	— 5	— 8,9	3,5	12,6	86	10	3,7	54
	+ 12,6	+ 2	3	10,7	72,5	20	8,6	63
	+ 36	+ 14,5	2,5	8,6	61	30	12,6	62
Les trois en quantité.	— 7,5	— 10,4	5,1	18,3	125	10	4	61,5 °/₀
	+ 10,3	+ 0,5	3,75	13,5	92	20	10	74
	+ 29,6	+ 12,4	3,4	12,2	83	30	15,9	78
	+ 48,5	+ 24	3,2	11,5	74	40	20,2	76
	+ 84,8	+ 46,4	2,66	9,1	65	60	27,9	68
	+ 105,1	+ 59	2,45	8,8	60	70	31	65

Rapport des engrenages, 1 : 5.
Tension : 500 volts.
Diamètre des roues : 0,780 *m.*
Voiture de 28 places à deux moteurs de 8 kilowatts.
Voiture attelée de 32 places, pesant chargée 5 000 *kg.*

EXPÉRIENCES FAITES PAR LA COMPAGNIE DE FIVES-LILLE

Sur une voiture automotrice de vingt-huit places à un seul moteur.

COUPLAGE des BOBINES INDUCTRICES	RAMPES 0/00		VITESSES		NOMBRE de tours de la roue	COURANT absorbé en ampères	PUISSANCE en chevaux	RENDEMENT y compris engrenage
	1 voiture automotrice	1 automobile et 1 voiture attelée	en mètres par seconde	en kilomètres à l'heure				
Les trois en série.	— 10,7	— 12,5	3,4	12,2	84	4	1,35	50 °/₀
	— 2,9	— 8	2,7	9,7	66	8	3	55
	+ 5,8	— 2,9	2,1	7,5	51	12	4	49
Deux en quantité sur la troisième en série.	— 9,3	— 11,7	3,5	12,6	86	5	1,85	54
	+ 0,7	— 5,8	3	10,7	72,5	10	4,3	63
	+ 12,5	+ 1	2,5	8,6	61	15	6,3	62
Les trois en quantité.	— 10,75	— 11,3	5,1	18,3	125	5	2	61,5 °/₀
	— 0,6	— 6,6	3,75	13,5	92	10	5	74
	+ 10,5	— 0,2	3,4	12,2	83	15	8	78
	+ 21,3	+ 6,1	3,2	11,5	74	20	10,1	76
	+ 42	+ 18,4	2,66	9,1	65	30	14	68
	+ 53,7	+ 25	2,45	8,8	60	35	15,5	65

Rapport des engrenages, 1 : 5
Tension : 500 volts.
Diamètre des roues : 780 *mm.*
} Voiture de 28 places, à un seul moteur de 8 kilowatts.

On voit que les rendements les plus élevés correspondent aux fortes puissances, ce qui est une très bonne condition d'établissement du moteur.

Comme on le voit, le rendement a varié suivant la charge de 49 à 78 0/0. Le rendement moyen a été de 60 à 65 0/0, non compris les pertes que donneraient les démarrages et les ralentissements dans un service courant. Nous devons ajouter que ces résultats doivent être considérés comme très satisfaisants et tout à fait en faveur de ces moteurs.

Si l'on tient compte en outre des pertes dans la ligne et du rendement des moteurs à vapeur, transmissions et dynamos à l'usine fixe, on voit qu'un rendement total de 40 0/0 peut être considéré comme un résultat satisfaisant et qu'il est très probable qu'on n'a jamais atteint 50 0/0 même dans les meilleures conditions.

Il ne faut pas perdre de vue, toutefois, que le système de traction électrique permet de réduire beaucoup le poids mort, ce qui compense dans une forte mesure la faiblesse du rendement; d'ailleurs le rendement des autres systèmes de traction mécanique n'est guère supérieur.

On voit par suite qu'un cheval-vapeur indiqué dans les cylindres moteurs à l'usine centrale donnera de 100 à 110 000 *kgm* utilisés aux voitures. En admettant une consommation de vapeur de 9 à 10 *kgm* par cheval indiqué et une vaporisation de 7 à 8 *kgm* par kilogramme de houille brûlée, ce qui correspond à de bonnes conditions d'établissement, on voit :

1° Que chaque kilogramme de vapeur dépensée donnera de 10 à 12 000 *kgm* aux jantes des roues;

2° Que chaque kilogramme de houille brûlée en donnera de 70 à 90 000.

§ 33. — En moyenne, le poids mort des organes électriques nécessaires à la traction, y compris le supplément de poids à donner au châssis et aux essieux ne dépasse pas 70 à 80 *kg* par place offerte et l'ensemble de la voiture entièrement équipée ne pèse pas plus de 150 à 160 *kg* par place offerte debout et assise. Les voitures légères d'été pèsent souvent moins.

Les voitures automotrices fermées de 28 à 32 places, type qui est le plus couramment utilisé à l'intérieur des villes, pèsent de 5 à 6 000 *kg* à vide.

Les grandes voitures de 40 à 50 places pèsent de 7 000 à 8 000 *kg* à vide.

Ces chiffres sont évidemment faibles pour des automobiles; il

y a lieu de remarquer que la tendance a été constamment de les augmenter.

Il en résulte que si on rapporte la consommation du combustible au nombre de voitures-kilomètres ou de places-kilomètres, les résultats sont plus favorables qu'en la rapportant au travail mécanique dépensé aux jantes des roues ou au nombre de tonnes-kilomètres.

Si nous fixons les poids en ordre de service à 10 ou 11 *t* pour les automobiles de 40 à 50 places, et à 7 ou 8 *t* pour celles de 28 à 32 places, et si nous supposons une résistance moyenne de 16 *kg* par tonne, nous en déduisons pour le travail kilométrique aux jantes des roues et la dépense correspondante de combustible, les valeurs suivantes :

1° 160 à 180 000 *kgm* avec une dépense de 2 *kg* à 2 1/4 *kg* de houille par kilomètre-voiture pour des automobiles de 40 à 50 places;

2° 120 à 130 000 *kgm* avec une dépense de 1 2/3 *kg* à 2 *kg* de houille par kilomètre-voiture pour les petites automobiles de 28 à 32 places.

En réalité, la dépense de combustible est plus grande à cause des pertes pour l'allumage des chaudières, de la force motrice absorbée par les services divers de l'usine et le courant absorbé par l'éclairage des voitures et des ateliers.

§ 34. — La consommation de houille est d'environ 3,5 *kg* à 4,5 *kg* par cheval dépensé aux jantes des roues, 0,20 *kg* à 0,30 *kg* par tonne kilométrique et de 2 *kg* à 3 *kg* par voiture-kilomètre.

La moyenne de six lignes développant ensemble plus de 160 *km* en exploitation aux États-Unis, a été de 0,25 *kg* par tonne kilométrique et 2,1 *kg* par kilomètre-voiture.

A Buda-Pesth, la consommation, depuis l'ouverture de la ligne, a varié de 5,4 *kg* à 2,20 *kg* par kilomètre-voiture pour des voitures de 34 places pesant 4 800 *kg* à vide. Elle a été constamment en diminuant; la voie est établie dans des conditions exceptionnellement favorables.

Au chemin de fer électrique aérien de Liverpool, dont l'exploitation a commencé en mars 1893, la consommation moyenne de houille, pendant le premier semestre, a été de 5 *kg* par train de deux voitures, soit 2,5 *kg* par voiture-kilomètre (Les voitures

sont de 57 places). Il y a lieu de remarquer que ces chiffres s'appliquent à un tramway roulant sur une voie horizontale à rails surélevés et s'arrêtant à des points fixes et non pas suivant la demande des voyageurs. Dans de pareilles conditions ils peuvent paraître assez élevés.

FRAIS DE PREMIER ÉTABLISSEMENT

§ 35. — En ce qui concerne la traction proprement dite, ces frais comprennent :

1° L'établissement de la ligne aérienne ou souterraine avec ses accessoires;

2° L'installation de l'usine centrale;

3° L'équipement électrique des voitures.

Établissement de la ligne.

Ces frais comprennent :

1° Ceux d'achat et de pose du réseau : poteaux de support, rosaces, isolateurs, câbles d'acier, fil de trolley, aiguillages, etc ;

2° L'assemblage électrique des rails et, s'il y a lieu, l'établissement d'un conducteur de retour;

3° L'achat et la pose des feeders nécessaires à l'alimentation du réseau.

L'établissement du réseau proprement dit, comprenant supports, câbles d'acier, fil de trolley et accessoires, revient à :

10 ou 12 000 *f* le kilomètre de voie simple avec poteaux en bois ou rosaces;

16 ou 20 000 *f* le kilomètre de voie simple avec poteaux métalliques.

Pour une ligne double ces prix doivent être augmentés de 3 à 4 000 *f*.

L'établissement d'un conducteur de retour en cuivre nu, noyé

dans le sol, y compris la pose, revient, suivant la section du câble, à 2 ou 3 000 *f* le kilomètre.

Quant au prix des feeders, il varie beaucoup suivant qu'ils sont aériens ou souterrains.

Quand la longueur de la ligne ne dépasse pas 4 000 *m*, on peut s'en passer; mais au delà leur emploi s'impose.

Si leur section est faible et ne dépasse pas celle des fils de trolley, on peut, à la rigueur, les faire aériens; mais dès que leur débit augmente, on est réduit à l'alternative d'en augmenter le nombre ou d'en augmenter le diamètre, ce qui est également impossible dans les villes.

On est alors obligé de les faire souterrains, comme les feeders à lumière. Ils doivent être, par suite, isolés et leur prix devient de suite important, soit qu'ils soient constitués par des câbles sous plomb, genre Siemens, noyés dans le sol, soit qu'ils soient constitués par des câbles armés posés dans des caniveaux en poterie. Ce prix dépend, évidemment, de leur section; pour des feeders de 80 à 100 mm^2 il serait d'environ 12 à 16 000 *f* le kilomètre, y compris achat et pose.

Leur développement oscille, en général, entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{5}$ de celui du réseau, suivant la disposition de ce dernier et la situation de l'usine centrale.

En résumé, les frais d'installation d'une ligne aérienne pour traction mécanique des tramways ressortent à environ 20 ou 30 000 *f* le kilomètre de réseau.

Ces chiffres sont évidemment des moyennes et n'ont rien d'absolu, car ils peuvent varier dans de grandes limites suivant l'importance, le luxe et la disposition des installations.

Les installations de lignes souterraines sont bien autrement coûteuses; les frais de premier établissement pour une ligne dans le genre de celle de Buda-Pesth dépasseraient, dit-on, 200 000 *f* le kilomètre, pour la seule partie électrique, non compris l'établissement métallique de la voie proprement dite.

Installation de l'usine centrale.

§ 36. — Cette installation comprend les générateurs à vapeur, les moteurs, les dynamos et accessoires et enfin les bâtiments d'usine, le tout prévu, en général, sur les bases suivantes :

Chaudières : 10 a 1 *m²* de chauffe par voiture en service.
Moteurs : 18 à 22 *ch* de force par voiture en service.
Dynamos : 14 à 15 kilowatts.
Non compris la réserve.

Cet ensemble revient, pour des installations moyennes de 8 à 20 voitures en service, à environ 11 000 *f* par voiture, ainsi répartis :

Générateurs, moteurs et accessoires.	6 000 *f*
Dynamos et appareils électriques	5 000 *f*

Quant aux bâtiments d'usine évalués sur la base de 80 à 100 *f* le mètre carré couvert, ils reviennent à environ 3 000 *f* par voiture en service.

Tous ces chiffres devant être augmentés d'au moins 35 0/0 pour tenir compte des machines de réserve indispensables, nous voyons qu'en moyenne, les frais de premier établissement de l'usine centrale peuvent ressortir à 18 ou 20 000 *f* par voiture en service.

Équipement électrique des voitures.

§ 37. — Au début, on a fait les voitures électriques beaucoup trop légères, principalement en ce qui concerne le châssis et les roues. La tendance maintenant est de les faire de plus en plus fortes et solides, même au prix de sacrifices sur le poids mort.

Les voitures de 50 places étudiées par la Compagnie Thomson-Houston pèsent de 7 500 à 8 000 *kg* à vide. Les voitures de 30 places pèsent de 5 000 à 6 000 *kg*.

Le prix des premières varie de 20 à 25 000 *f*, tout compris. Mais il y a lieu de tenir compte du poids et du prix de la voiture ordinaire à voyageurs de même contenance qu'elles remplacent et qui s'élèvent de 5 à 7 000 *f* pour des voitures de 3 500 à 4 000 *kg*. Par suite, l'équipement électrique des voitures amène une surcharge de 3 500 à 4 000 *kg* et une plus-value de 15 à 18 000 *f*.

Ces chiffres s'entendent pour des voitures à deux essieux et à deux moteurs à simple réduction de 15 *ch*, offrant 50 places debout et assises.

Le prix des petites automobiles de 28 à 32 places est naturellement moindre; il varie de 15 à 18 000 *f* dont seulement 11 à 12 000 pour l'équipement électrique.

On prévoit, en général, un quart de voitures en plus que le nombre strictement nécessaire au service, pour les réserves et les réparations, ce qui porte les frais d'équipement électrique des voitures à 18 ou 20 000 *f* par voiture en service de 50 places.

§ 38. — Les frais de premier établissement peuvent alors se résumer comme suit :

Ligne aérienne : 20 à 30 000 *f* le kilomètre de voie.
Ligne souterraine : environ 100 000 *f* le kilomètre de voie.
Matériel fixe et roulant : 36 à 40 000 *f* par voiture en service.

Chaque voiture peut faire, en 15 heures de travail, un service actif journalier, de 140 à 160 *km*, selon les conditions de vitesse imposées ou autorisées.

Il peut être intéressant de tout rapporter à la même unité : soit au kilomètre de voie, soit au nombre de voitures en service. Il faut alors faire une hypothèse sur l'activité du trafic. En supposant successivement que le nombre de voitures en service par kilomètre de voie soit 1, 2 et 3, nous avons trouvé les résultats moyens contenus dans le tableau ci-joint:

PAR VOITURE EN SERVICE :

	MATÉRIEL FIXE et ROULANT	FRAIS DE LA LIGNE			TOTAUX		
		1 voiture par kilom.	2 voitures par kilom.	3 voitures par kilom.	1 voiture par kilom.	2 voitures par kilom.	3 voitures par kilom.
Ligne aérienne	38 000	25 000	12 500	8 300	63 000	50 500	46 300
Ligne souterraine. . . .	38 000	100 000	50 000	33 000	138 000	88 000	71 000

Ce tableau montre que l'influence de la ligne diminue au fur et à mesure que le trafic augmente, ce qui permet de faire pour cette ligne des sacrifices plus grands.

A l'appui de ces chiffres, nous donnons ci-après les dépenses de premier établissement du tramway électrique de Marseille, ayant une longueur de 6 120 *m* entre le cours Belzunce et Saint-Louis, et dont l'installation électrique a été faite par MM. Sautter et Harlé.

Voie.		360 000 *f*
Établissement de la ligne.	180 000 *f*	
Dépenses nécessitées par le téléphone .	70 000	
		250 000
Bâtiments d'usine.	85 000	
Moteurs, Chaudières et Dynamos . . .	195 000	
		280 000
Dix-huit voitures entièrement équipées.		364 000
Remises et voies de service		46 000
Bâtiments d'administration et frais généraux . .		145 000
Total . .		1 445 000 *f*

Soit environ 235 000 *f* le kilomètre et 80 000 *f* par voiture automotrice.

L'installation à Bruxelles de la ligne allant de la place Roupe à la petite Espinette, sur une longueur de 9 900 *m* dont 2 200 à double voie, a nécessité les frais suivants:

1° Achat de 12 voitures automotrices de 35 places.	264 000 *f*
2° Installations électriques fixes pour la traction.	424 000
Total . .	688 000 *f*

Soit environ 70 000 *f* par kilomètre de voie et 68 800 *f* par voiture automotrice en service, en comptant 10 voitures mises à la fois en service sur les 12.

Frais d'exploitation.

§ 39. — Les tramways électriques ont été jusqu'à présent surtout exploités aux États-Unis et les renseignements que l'on possède sur ces frais d'exploitation sont assez vagues; il y a d'énormes différences dans les résultats financiers des différentes Compagnies, différences qui sont, à vrai dire, en partie justifiées par de grandes différences dans les conditions d'exploitation: étendue du réseau, activité du trafic, prix du combustible et de la main-d'œuvre.

Ci-après, nous donnons les résultats d'exploitation de la Compagnie des Tramways de Cincinnati et de la Compagnie Edison à New-York, d'après les renseignements officiels fournis par ces Compagnies.

RÉPARTITION DES DÉPENSES DE TRACTION EN CENTIMES PAR KILOMÈTRE-VOITURE	TRAMWAYS CINCINNATI	COMPAGNIE EDISON
	cm	*cm*
Entretien de la ligne et de l'usine.	0,4	1,5
Entretien du matériel roulant	4,4	6,1
Prix de la force motrice.	10,2	6,6
Personnel de conduite.	7,2	6,7
TOTAUX	22,2	20,9

Ces chiffres s'appliquent à des voitures légères pesant 4 *t* à vide, en service 15 à 20 à la fois et effectuant chacune de 160 à 180 *km* par jour.

§ 40. — Nous avons réuni dans le tableau suivant les relevés mensuels des frais d'exploitation de l'immense installation électrique de Boston pendant l'année 1891, installation comprenant plus de 200 *km* de voie et 500 voitures en service.

RÉPARTITION DES DÉPENSES EN CENTIMES PAR KILOMÈTRE-VOITURE.	AVRIL 1891	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT
Puissance motrice	24	26,6	22,8	21,8	21,9
Entretien	4,3	4,1	3,7	3,6	4,9
Personnel.	22,8	22,9	22,6	21,6	21,4
Dommages	2,3	2,8	0,5	0,4	0,7
Autres dépenses.	14,4	14,2	13,9	16,4	15,6
TOTAUX	67,8	69,6	63,5	63,8	64,5

Ces chiffres s'appliquent à des voitures pesant de 6 à 8 *t* à vide et effectuant un parcours journalier de 150 à 160 *km*.

Enfin le tableau suivant représente, d'après des renseignements fournis en 1891 au meeting de Pittsburg, les dépenses d'exploitations de 22 lignes électriques développant ensemble 300 *km*, de longueurs variant de 6 à 82 *km*, ayant de 5 à 40 voitures en service effectuant de 120 à 240 *km* par jour.

RÉPARTITION DES DÉPENSES EN CENTIMES PAR KILOMÈTRE-VOITURE	MAXIMUM	MINIMUM
Entretien des voies et du pavage	5,77	0,31
— de la ligne	2,95	0,03
— de l'usine centrale	2,67	0,16
— des voitures	16,24	1,83
Force motrice : main-d'œuvre et combustible.	15,35	1,49
Personnel de conduite et de surveillance. .	29,36	8,49
Frais généraux	9,15	2,45
Totaux des Dépenses. . . .	71,27	24,15

D'après ces renseignements, les dépenses moyennes de traction proprement dite ressortiraient ainsi :

Entretien de la ligne et de l'usine centrale en centimes.	1 50
Force motrice : salaires et combustible.	6 10
Entretien du matériel roulant	6 60
Personnel de conduite	6 60
Total en centimes par voiture-kilomètre. . .	20 80

le prix du charbon variant de 5 à 19 *f* la tonne et la main-d'œuvre de 0,50 *f* à 1 *f* l'heure.

Ces chiffres ne comprennent pas l'amortissement des machines fixes et du matériel roulant.

En pratiquant cet amortissement à raison de 10 0/0 sur les chaudières, moteurs, conducteurs électriques et électromoteurs et à raison de 5 0/0 sur les dynamos et leurs accessoires (ce qui nous paraît tout à fait insuffisant), ces frais d'amortissement grèveraient le prix de revient de la voiture-kilomètre d'environ 0,067 *f*, ce qui élèverait le total des frais de traction à 0,275 *f*.

Les conditions d'exploitation des lignes américaines sont trop différentes de celles admises en Europe, surtout en ce qui concerne les vitesses tolérées et les réductions de personnel, pour pouvoir servir de base à une comparaison.

Lignes européennes.

§ 41. — La plupart des installations de tramways électriques en Europe sont encore trop récentes et trop peu nombreuses pour qu'on puisse tirer des conclusions absolues des résultats de leur

exploitation. Nous jugeons toutefois intéressant de donner quelques renseignements sur quelques-unes d'entre elles, établies dans des conditions complètement différentes.

DÉSIGNATION DES LIGNES	VEVEY-MONTREUX	CLERMONT-FERRAND	BUDA-PESTH
	cm	*cm*	*cm*
Entretien de la ligne et de l'usine . . .	0,9	1,2	0,9
Force motrice	7,6	10,3	7,1
Entretien du matériel roulant.	5,7	4,4	7,2
Personnel de conduite	6,2	8,1	4,6
DÉPENSES TOTALES par kilomètre-voiture.	20,4	24,0	19,8

La ligne de Vevey-Montreux est exploitée par force hydraulique.

Les deux autres sont exploitées par machine à vapeur : la ligne de Buda-Pesth est à conducteur souterrain et les deux autres à fil aérien.

§ 42. — Nous ajoutons à ces renseignements quelques détails sur les tramways de la ville de Halle, où la traction animale a été remplacée, en 1891, par la traction électrique, système Sprague.

Longueur de la ligne, 7 700 *m*.

Rampes nombreuses de 25 à 48 *mm* par mètre.

	EXPLOITATION ANIMALE	TRACTION ÉLECTRIQUE
Nombre de kilomètres-voiture.	755 520	799 444
Dépenses d'exploitation :	pf	pf
Frais du personnel.	8,93	8,39
Frais généraux (y compris loyer)	1,93	2,27
Entretien de la ligne et des immeubles. . .	0,32	0,41
— des voitures	0,77	1,34
Chevaux et harnais	9,72	»
Force motrice.	»	2,94
DÉPENSES TOTALES . . .	21,67	15,35
RECETTES par kilomètre-voiture . .	20,83	25,10

Ces chiffres s'appliquent à des voitures de 34 places pesant environ 6 *t* à vide. Le profil est très accidenté.

§ 43. — Le prix de revient de la traction électrique sur les tramways de Marseille aurait été de 0,25 *f* à 0,28 *f* le kilomètre-voiture pour des voitures de 50 places pesant 6 500 *kg* à vide. A Milan le prix de revient de la traction serait de 0,275 *f* la voiture-kilomètre. A Dresde, sur une ligne en entier en palier, à laquelle le courant est fourni par une station centrale, ce prix aurait été de 0,195 *f*. Ces chiffres s'appliquant à de petites automobiles de 28 à 30 places.

Au chemin de fer électrique aérien de Liverpool, le prix de revient de la traction a varié de 0,21 *f* à 0,24 *f* par voiture-kilomètre de 56 places.

Ces différents chiffres ne comprennent pas, bien entendu, l'amortissement. Les grandes Compagnies d'électricité garantissent en général un prix de revient de la traction inférieur à 0,25 *f* ou 0,30 *f* par kilomètre-voiture, ce prix comprenant l'entretien et le fonctionnement de l'usine, des moteurs, de leur transmission, celui de la ligne, les dépenses de force motrice, les salaires des conducteurs-machinistes et l'entretien du matériel roulant. Il ne comprend pas l'amortissement.

En supposant cet amortissement pratiqué à raison de 10 0/0 sur les machines fixes et les équipements électriques des voitures et évaluant les dépenses de premier établissement de ce chef à 30 ou 35 000 *f* par voiture en service effectuant un parcours kilométrique annuel de 45 à 50 000 *km*, les charges qui résultent de cet amortissement ressortent à 0,065 *f* à 0,070 *f* par voiture-kilomètre.

Le fil de trolley s'use assez rapidement; il doit être remplacé à peu près tous les six ou sept ans. Cette usure provient non seulemen de l'action mécanique des galets, mais surtout de celle beaucoup plus destructive des étincelles électriques qui jaillissent entre le galet et le fil, aussitôt que le contact n'est plus parfait entre eux.

L'amortissement de la ligne supposé pratiqué à raison de 5 0/0 avec un parcours kilométrique annuel de 100 000 *km* par kilomètre de ligne revient à environ 0,0125 *f* par kilomètre-voiture.

On voit, par suite, qu'avec la traction électrique par fil aérien, la charge totale d'amortissement correspondant à la traction peut être estimée en moyenne à 0,08 *f* par kilomètre-voiture.

Nous reviendrons plus loin sur cette importante question de

l'amortissement, sur laquelle on ne peut être encore bien fixé en Europe, car l'expérience ne dure pas depuis assez longtemps pour qu'on puisse apprécier exactement la durée des moteurs électriques, lesquels constituent un facteur important des frais de premier établissement.

Avantages et inconvénients de la traction électrique.

§ 44. — Les tramways électriques ont pris un très grand développement aux États-Unis et ils commencent à se répandre rapidement en Europe. En France, plusieurs installations viennent d'être terminées depuis peu ou sont en cours d'exécution, comme les lignes de Bordeaux au Bouscat, de Lyon-Oullins, de Marseille à Saint-Louis, les réseaux du Havre, de Roubaix-Tourcoing, etc. Hors de France : les réseaux de Hambourg, de Bruxelles, de Buda-Pesth, les lignes de Remschied, Halle, Brême, Milan, etc.

Cette rapide faveur est évidemment méritée par les efforts intelligents des puissantes Compagnies d'électricité qui ont monopolisé et lancé ce système, et par les avantages de ce mode de traction, cher de premier établissement, mais souple, rapide et agréable, infiniment supérieur à tous les points de vue à la traction animale, qu'il est, en général, appelé à remplacer.

Ce système se prête admirablement à la circulation à l'intérieur des villes de voitures automobiles de toutes dimensions; il possède une élasticité assez grande pour desservir presque toutes les rampes que les conditions d'adhérence permettraient d'aborder, c'est-à-dire jusqu'à 10 à 11 0/0 pour les automobiles à deux moteurs.

Il est également très facile à ces automobiles de remorquer des voitures ordinaires quand l'intensité du trafic et les besoins du moment peuvent le demander.

Le parcours journalier, à égales conditions de vitesse maxima, est plus considérable qu'avec tous les autres systèmes, ce qui permet d'obtenir une très bonne utilisation du matériel et du personnel.

Enfin le prix de revient de la traction est faible; on peut même dire que dans beaucoup de cas ce système paraît être le plus économique, surtout quand la puissance motrice est empruntée à une chute d'eau ou quand la même usine fournit la lumière et le courant nécessaire à la traction.

Mais ces avantages incontestables ne sont pas sans être balan-

cés par quelques graves inconvénients dont la pratique n'a pu encore déterminer l'importance exacte, et qui ne laissent pas que d'être particulièrement embarrassants à l'intérieur des villes.

En premier lieu, l'aspect des réseaux de fils aériens est peu agréable à l'œil et n'en fera que bien difficilement admettre l'emploi dans la plupart des grandes villes soucieuses de leur esthétique. On peut éviter cet inconvénient par l'adoption de lignes souterraines; mais alors les frais de premier établissement augmentent démesurément et l'adoption de la traction électrique n'a vraiment plus de raisons d'être plausibles. De plus, le bon isolement devient beaucoup plus difficile à obtenir et il faut renoncer aux tensions de 500 volts pour réduire le voltage à 250 ou 300 volts au plus. L'installation de Buda-Pesth n'a donné de bons résultats qu'à cette condition. Il y a lieu de remarquer que la Compagnie exploitante, perdant, à la fin de sa concession, la propriété de tous les travaux effectués sur la voie publique, a intérêt à restreindre dans la mesure du possible cette catégorie de dépenses.

§ 45. — Les autres inconvénients proviennent, pour la plupart, des actions électriques des courants circulant dans les conducteurs du réseau.

La tension généralement employée est de 5 à 600 volts. Cette tension est déjà élevée et nécessite des isolants beaucoup plus efficaces que ceux employés dans les installations à lumière. Leur action, mortelle pour les chevaux, ne paraît pas l'être pour les personnes humaines bien constituées; toutefois, on cite quelques accidents suivis de mort sans qu'on ait jamais pu déterminer, d'une manière précise, si la mort était due ou non à l'action du courant. Rien n'est d'ailleurs plus variable et plus capricieux que l'action physiologique des courants à haute tension, et il est bien difficile de préciser la limite à laquelle ils perdent leur caractère meurtrier, cette limite dépendant beaucoup de l'organisme des individus comme certains exemples d'électrocution l'ont trop bien montré.

De toute façon, il y a évidemment quelque inconvénient à disposer à quelques mètres au-dessus de la voie publique des réseaux de fils dont le contact ou seulement le mauvais isolement peut amener de fâcheux résultats pour la sécurité des passants; on doit, toutefois, ajouter que l'isolement des lignes aériennes se maintient remarquablement bien.

Les perturbations causées par le passage du courant, dans les lignes téléphoniques placées dans le voisinage, constituent un troisième et très sérieux inconvénient. L'induction produite dans ces fils par les variations du courant est la source de courants parasites accompagnés de bruits insupportables qui rendent les communications téléphoniques totalement impossibles. On a essayé toutes sortes de remèdes à ce défaut, mais on n'a pas trouvé d'autres palliatifs que d'éloigner le plus possible les conducteurs électriques des fils téléphoniques et de doubler ces derniers, palliatifs qui entraînent malheureusement à de fort grandes dépenses.

§ 46. — En dernier lieu, nous devons signaler les graves dommages causés par l'emploi de la terre comme retour de courant, aux canalisations métalliques avoisinant la ligne de tramway.

On sait que, dans le système à fil aérien, l'un des pôles de la dynamo est relié au fil de trolley, et l'autre à la terre, le retour du courant se faisant par les rails.

Dans les débuts, on crut que ces rails, grâce à leur forte section, offraient au courant de retour un chemin facile jusqu'à la station centrale; mais la discontinuité de ces rails aux éclissages ne tarda pas à donner beaucoup de mécomptes et à causer des dérivations importantes par la terre vers les grandes masses métalliques voisines: tuyaux de gaz, conduites d'eau, câbles téléphoniques, etc. Il en résulta des phénomènes d'électrolyse d'un caractère très variable suivant la nature des terrains, et qui, dans beaucoup de villes, causèrent à ces conduites des dommages très sérieux et amenèrent des protestations très vives de la part des intéressés.

On a cherché à atténuer ce défaut en établissant entre les rails des connexions électriques plus parfaites, au moyen de fils de cuivre reliant les différents tronçons entre eux et au rail opposé, puis en adjoignant aux rails un conducteur de retour formé d'un câble en cuivre nu à forte section relié, de distance en distance, aux rails et se prolongeant jusqu'à l'usine centrale. On a même relié ce conducteur de retour à l'usine centrale au moyen de plusieurs véritables feeders. Mais ces moyens ne sont guère que des palliatifs.

Les courants électriques se divisant d'après les lois des dérivations électriques n'en suivent pas moins tous les chemins qui s'offrent à eux pour le retour à la dynamo et en particulier ten-

dent toujours à se diriger vers les grandes masses métalliques formées par ces conduites qui leur présentent une section d'écoulement énorme. Les points par lesquels le courant tend à quitter ces conduites deviennent le siège d'actions électrolytiques plus ou moins actives qui amènent, plus ou moins rapidement, leur corrosion profonde.

L'expérience a montré que de très faibles différences de potentiel, des fractions de volt même, suffisaient à déterminer des attaques très énergiques : on a parfois relevé des différences de potentiel de plusieurs volts entre les tuyaux et les rails.

Le bureau des concessionnaires des Voies souterraines de Brooklyn a présenté dernièrement au maire de cette ville un rapport qui jette une assez vive lumière sur ces curieux effets de corrosion : des faits analogues ont été observés dans beaucoup d'autres villes où la traction électrique a été installée : Cambridge, Indianapolis, Milwaukee, Boston, etc.

M. Fornham, ingénieur de la « New England Telephone Company », a fait des expériences très complètes et très intéressantes à Boston, desquelles il a pu tirer les conclusions suivantes que l'on trouvera assez inquiétantes :

1° Tous les tramways à trolley unique donnent lieu à une action électrolytique et, par conséquent, à une attaque des tuyaux et câbles dans leur voisinage immédiat;

2° Une fraction de volt de différence entre les tuyaux et la terre humide qui les entoure suffit pour occasionner l'attaque;

3° L'assemblage électrique des rails et l'établissement d'un conducteur de retour à forte section sont des moyens insuffisants pour conjurer le danger;

4° Il est, de même, inutile et coûteux de munir les tuyaux à protéger de grandes plaques de terre, car la surface d'attaque est trop considérable;

5° Un isolement, même soigné, des câbles et tuyaux au moyen de brai ne les préserve en rien des actions électrolytiques; il n'est pas plus utile de chercher à interrompre leur continuité électrique au moyen de joints mauvais conducteurs;

6° Il est préférable de relier le pôle positif de la dynamo au fi de trolley. Le sens du courant ainsi déterminé est moins préjudiciable à la bonne conservation des tuyaux;

7° Le procédé qui a donné les meilleurs résultats consiste à relier l'autre pôle de la dynamo à un fort conducteur, relié tous les 30 *m* aux rails et aux tuyaux menacés. Il est bon d'employer un conducteur séparé pour chaque groupe de tuyaux à protéger. Mais il n'est pas du tout suffisant d'établir une simple liaison à l'usine entre ces tuyaux et la dynamo;

8° Les jonctions entre les tuyaux et les rails doivent être l'objet d'une surveillance active et des mesures électriques fréquentes doivent être prises pour s'assurer de l'équilibre de potentiel entre les tuyaux à protéger et les corps environnants.

La Compagnie Nationale des Téléphones en Angleterre et les Sociétés distribuant le gaz et l'eau ont fait une opposition des plus vives au système de traction électrique utilisant la terre comme retour et l'ont empêché de se répandre dans ce pays. La question a été examinée par une Commission parlementaire qui a réglementé d'une manière détaillée les conditions dans lesquelles ce retour pouvait être autorisé et les précautions à observer dans ce cas.

Ces inconvénients perdent évidemment beaucoup de leur gravité pour les lignes suburbaines ou vicinales; mais alors, on n'a plus autant d'intérêt à employer des voitures automobiles et l'emploi de trains peut souvent être plus avantageux.

On n'a pu encore, en Europe, se rendre compte d'une manière exacte de l'importance véritable des objections que nous venons de présenter, la traction électrique n'étant pas employée encore depuis assez longtemps et sur une assez vaste échelle pour que ses inconvénients se soient vivement fait sentir. Il n'y a pas eu jusqu'à présent de réclamations trop vives dans les villes où le système a été installé.

Mais il faut croire que la question a pris un caractère plus aigu aux États-Unis, quand on voit la Metropolitan Traction Company de New York fonder un prix de 250 000 *f* pour l'inventeur d'un système de tramway urbain ayant des avantages équivalents à ceux du système à trolley, sans en avoir les inconvénients.

DEUXIÈME PARTIE

TRAMWAYS DE LA DEUXIÈME CATÉGORIE

CLASSIFICATION

§ 47. — Les systèmes que nous venons de passer en revue présentent tous un défaut commun : la dépendance complète et immédiate du fonctionnement des voitures de celui de l'usine centrale et de la ligne de transmission. Un accident survenant à l'usine ou à la ligne et empêchant momentanément la production ou la transmission de l'énergie, produit instantanément l'arrêt de tout le service sur le réseau correspondant.

Les voitures sont même dépendantes les unes des autres dans une certaine mesure, les accidents arrivant à une d'entre elles pouvant influer sur toutes celles qui sont desservies par la même ligne; de plus, elles perdent tout moyen de locomotion aussitôt qu'elles quittent le contact du câble ou du conducteur qui leur transmet la force et c'est là une gêne considérable pour la facilité du service, pour les manœuvres aux points terminus, dans les garages, etc.

Aussi, toutes choses égales d'ailleurs, nous semble-t-il préférable de fournir à chaque voiture ou train la puissance nécessaire à son déplacement pendant un certain temps, de manière à le rendre complètement indépendant des autres, à donner plus de sécurité à l'exploitation et à éviter toutes causes d'arrêt complet et instantané du service.

L'énergie doit alors être « accumulée » sous une forme ou une autre dans chaque train ou voiture, en quantité suffisante pour lui permettre d'effectuer un parcours déterminé entre deux opérations de chargement.

Les systèmes de traction mécanique basés sur ce principe forment une catégorie spéciale comprenant notamment :

1° Le système de traction électrique par accumulateurs;

2° Le système de traction par l'air comprimé ;

3° Le système de traction par locomotives à vapeur, comprenant lui-même : le système par locomotives à foyer, le système par locomotives sans foyer, le système par locomotives à foyer à grand volume d'eau.

Pour ne citer que les systèmes ayant reçu la sanction d'une pratique sérieuse et prolongée.

CHAPITRE PREMIER

Traction électrique par accumulateurs.

Avantages et inconvénients du système.

§ 48. — Arriver à supprimer les fils aériens ou souterrains avec tous les embarras qu'ils entraînent, c'est-à-dire supprimer tous les inconvénients de la traction électrique, tout en en conservant les avantages et les agréments, c'est là une idée séduisante et bien faite pour tenter beaucoup de personnes.

Aussi a-t-on cherché, à plusieurs reprises, à la réaliser par l'emploi des accumulateurs, au fur et à mesure que la construction et le fonctionnement de ces derniers allait en s'améliorant.

Dans ce système, au lieu de transmettre à chaque instant à chaque voiture la force de propulsion qui lui est nécessaire, on la munit d'une batterie d'accumulateurs électriques chargée dans une usine centrale et qui lui fournit l'énergie nécessaire à son fonctionnement pendant plusieurs heures après lesquelles on remplace la batterie épuisée par une autre nouvellement chargée et ainsi de suite.

Cette énergie est utilisée et transmise aux essieux par le moyen de moteurs électriques identiques à ceux que nous avons déjà passés en revue.

Ce mode de faire procure trois avantages considérables :

1° Il assure l'indépendance absolue des voitures;

2° Il supprime tout embarras sur la voie publique : poteaux, supports, fils, etc.

3° Il permet la production de l'énergie à l'usine centrale, d'une manière régulière et sans les fluctuations et les à-coups que nous avons signalés dans le système à fil. L'usine centrale peut même fonctionner sans interruption pendant vingt-quatre heures consécutives, ce qui donne une meilleure utilisation du matériel.

Malheureusement, ce système pèche par la base, en ce que l'outil principal manque; l'accumulateur idéal, robuste, léger, de grand rendement et de longue durée, capable de supporter sans altération un service aussi dur que celui de la traction des tramways, n'existe pas encore.

De là vient que toutes les tentatives faites pour mettre en pratique ce système de traction, tant en Amérique qu'en Europe, n'ont été, jusqu'à présent, qu'une suite d'échecs décourageants.

Nous citerons notamment les exploitations faites à Bruxelles, rue de la Loi, au moyen d'accumulateurs Jullien, et à Paris, sur la ligne du boulevard Malesherbes, au moyen d'accumulateurs Philippart, qui ont dû interrompre leur service au bout d'un certain temps de fonctionnement.

Actuellement, on peut citer trois exploitations de ce genre fonctionnant en Europe : celles de la Haye-Scheweningue, en Hollande, de Birmingham, en Angleterre, et des lignes de Saint-Denis à la Madeleine, à l'Opéra et à Neuilly, à Paris.

Nous donnerons quelques détails sur cette dernière exploitation, qui est la plus récente, qui fonctionne régulièrement depuis un ou deux ans et qui paraît résumer tous les perfectionnements compatibles avec l'état actuel de l'industrie des accumulateurs.

§ 49. — Les deux premières lignes ont une longueur d'environ 9 250 *m* chacune, dont moitié à l'intérieur de Paris, et présentent des rampes maxima de 35 à 36 *mm* par mètre sur des longueurs de 2 à 300 *m*.

La troisième ligne, longue de 6 000 *m*, est en entier hors de la ville et à peu près de niveau sur tout son parcours : rampe maxima, 24 *mm*.

Le service se fait, sur chacune des premières lignes, au moyen de 7 voitures automobiles, à impériale couverte de 50 places et, sur la troisième, au moyen de 3 voitures de même type.

Ces voitures, complètement équipées, pèsent de 10 à 11 *t* à vide et environ 14 *t* avec leur chargement complet de voyageurs. Leur particularité la plus saillante réside dans le mode de suspension de la caisse qui repose, par l'intermédiaire de galets, sur deux trucks à un essieu munis de chevilles ouvrières, ces deux trucks étant articulés entre eux à ressorts, de manière à pouvoir converger dans les courbes. Cette disposition, qui augmente un peu le poids mort, est excellente au point de vue du fonctionnement.

Chaque essieu est actionné par un moteur électrique au moyen

d'un double train d'engrenages baignés dans l'huile; la réduction de vitesse est dans le rapport de 12 à 1. Ces moteurs tournant à près de 1 400 tours n'ont pas donné beaucoup de satisfaction par suite de leur trop grande vitesse et il est question de les remplacer par des moteurs à simple réduction tournant à 500 tours.

L'excitation se fait en série.

Les batteries d'accumulateurs sont placées sous les banquettes des voitures; ces batteries, du système Laurent Cély, ont été fournies par la Société pour le travail électrique des métaux.

Elles se composent, pour chaque voiture, de 108 éléments à 11 plaques contenus dans des bacs en ébonite et ayant les dimensions suivantes :

Surface des plaques : 0,200 $m \times$ 0,200 m;
Épaisseur : 6 à 8 *mm*;
Poids : 18 *kg* par élément.

Les 108 éléments sont répartis en 4 sous-batteries comprenant chacune 3 caisses de 9 éléments, les éléments de chaque caisse et les 3 caisses de chaque sous-batterie étant groupés en série de telle sorte que chaque sous-batterie contient, en définitive, 27 éléments en tension donnant, à circuit fermé, une différence de potentiel d'environ 50 volts. L'introduction des caisses dans les voitures établit automatiquement les connexions électriques entre tous les éléments des sous-batteries. Au moyen d'un commutateur on peut obtenir les trois couplages suivants des sous-batteries :

1° Les 4 sous-batteries sont groupées en quantité : force électromotrice, 50 volts;

2° Les 4 sous-batteries sont groupées par deux en tension : force électromotrice, 100 volts;

3° Les 4 sous-batteries sont groupées en tension : force électromotrice, 200 volts.

On peut donc faire varier la force électromotrice aux bornes des moteurs et, par suite, leur vitesse de rotation du simple au quadruple, suivant l'effort de traction à développer.

Les moteurs des voitures sont généralement associés en série; toutefois, on peut, au moyen du commutateur, les coupler en quantité, quand on veut obtenir une plus grande vitesse ou obtenir le maximum d'effort de traction.

On peut également renverser le sens du courant dans les induc-

teurs pour la marche arrière et mettre, au besoin, hors circuit l'un ou l'autre des deux moteurs.

Le service de chaque voiture est assuré par deux batteries dont une est à la charge, tandis que l'autre actionne la voiture.

Chaque batterie pèse environ 3 000 *kg* et peut fournir, sans recharge, un parcours de 55 à 60 *km*.

§ 50. — La charge des batteries se fait sur des bancs formés de madriers goudronnés, supportés au moyen d'isolateurs en verre sur des piles en briques. Le manque de place n'ayant pas permis de disposer une voie de garage le long de chaque banc de charge, ainsi qu'à Birmingham, on effectue la manutention des batteries au moyen de wagonnets roulant, sur des voies Decauville, le long des bancs et des voies de garage, et ayant leur plate-forme mobile de manière à pouvoir être amenée exactement au niveau de l'intérieur des voitures et des bancs de chargement. Une opération de chargement nécessite 7 wagonnets ; la manutention et le transbordement se font au moyen de 6 manœuvres qui effectuent 34 chargements et déchargements par jour et parfois même davantage.

Il y a pour la charge 24 emplacements de batteries desservis chacun par un circuit spécial ayant son ampèremètre et son indicateur de sens de courant avec sonnerie avertisseuse.

La charge des batteries se fait sous potentiel constant de 260 volts, soit 2,4 volts par élément. Aussi l'intensité du courant de charge varie-t-elle énormément depuis le commencement jusqu'à la fin de chaque charge ; au début elle atteint jusqu'à 10 ampères par kilogramme de plaque, diminue ensuite rapidement, puis plus régulièrement au fur et à mesure que l'élément approche de sa saturation. L'intensité moyenne est de 2 à 2,5 ampères par kilogramme de plaque. On arrête la charge quand la batterie a absorbé un nombre d'ampères-heures supérieur d'environ 17 à 18 0/0 à celui qu'elle a débité en service. L'indicateur de sens de courant prévient, au moyen de sa sonnerie, aussitôt que le sens tend à se renverser, ce qui permet de mettre la batterie hors circuit.

Au point de vue du rendement comme à celui de la durée des batteries, on a tout intérêt à ne pas les laisser épuiser leur capacité entre deux charges, mais à multiplier, au contraire, le nombre de ces dernières.

La durée de la charge est d'environ six heures pour une batterie ayant donné toute sa capacité qui est d'environ 230 ampères-heures.

Le courant de charge est fourni par 3 machines dynamos Desroziers donnant à la vitesse de 600 tours, chacune 230 ampères sous 260 volts, et chaque dynamo est actionnée par courroies par une machine à vapeur de 125 *ch*.

Deux des unités fonctionnent pendant vingt-trois heures par jour et la troisième pendant six heures.

Le courant de décharge est naturellement très variable suivant la résistance du profil : sur la ligne de Neuilly où les rampes maxima sont de 24 *mm* par mètre, son intensité atteint jusqu'à 62 ampères, soit 3,5 ampères par kilogramme de plaque, et sur les lignes de la Madeleine et de l'Opéra où les rampes maxima sont de 36 *mm* par mètre, jusqu'à 80 et 90 ampères, soit près de 5 ampères par kilogramme de plaque. Sa valeur moyenne, sur ces dernières lignes est d'environ 35 ampères correspondant à un peu moins de 2 ampères par kilogramme de plaque.

Des intensités aussi élevées avec de pareilles variations du débit, venant se joindre aux trépidations continuelles du mouvement et aux transbordements fréquents, constituent un régime excessivement défavorable à la bonne conservation des accumulateurs.

La Société pour le travail électrique des métaux a entrepris l'entretien et le renouvellement des siens à forfait, à des conditions restées secrètes.

Toutefois les sommes portées à l'article « Manutention et entretien des accumulateurs » dans l'établissement du compte d'exploitation de la Compagnie des Tramways Nord, édifient à cet égard et inspirent des réflexions fort peu encourageantes.

§ 51. — Les installations de la Haye-Scheweningue et de Birmingham fonctionnent à peu près d'après les mêmes principes généraux que celles de Paris-Saint-Denis et ne présentent aucune particularité bien saillante.

Aux États-Unis, différentes tentatives ont été faites sans succès dans la même voie ; dernièrement le système de traction par accumulateurs a été essayé à New-York, mais au lieu des accumulateurs au plomb ordinaires, on a employé les accumulateurs système Commelin-Desmazures, au cuivre et au zincate de potasse.

Chaque voiture contient 144 éléments dont 16 pour l'éclairage et l'excitation indépendante des moteurs et 128 pour l'alimentation des induits. Le poids de chaque élément est de 13 *kg*, sa capacité maxima serait de 350 ampères-heures sous une différence

de potentiel de 0,82 volts, soit 22 watts-heures par kilogramme de plaque.

Chaque voiture possède deux batteries : l'une en charge et l'autre en service ; entre deux recharges une batterie peut effectuer 32 *km* permettant de marcher 2 heures et demie à 3 heures avec un débit moyen de 40 à 45 ampères. Les essais n'auraient, paraît-il, pas donné de bons résultats.

D'autres essais se poursuivent actuellement à Liège, sur lesquels nous n'avons pas encore de renseignements.

Frais de premier établissement.

§ 52. — Il est assez intéressant de comparer les frais de premier établissement par le système à fil aérien avec celui par le système à accumulateurs. L'emploi de ce dernier donne peut-être dans l'installation de l'usine centrale une certaine économie provenant de ce que les machines peuvent fonctionner à leur pleine charge pendant vingt-quatre heures consécutives. Toutefois cette économie n'est guère sensible.

En moyenne, l'usine de force motrice pourra être prévue sur les bases suivantes :

Chaudières. . . .	14 à 15 m^2 par voiture de 50 places en service.
Moteurs à vapeur .	16 à 18 *ch.*
Dynamos.	13 à 14 000 watts.

Non compris la réserve nécessaire.

Cet ensemble reviendra à très peu près au même prix que celui nécessaire pour une installation de même importance par fi aérien.

L'équipement électrique des voitures, accumulateurs déduits, reviendra à peu près au même prix également; il y a toutefois lieu de remarquer que le poids mort étant sensiblement plus grand, les moteurs devront être plus puissants et la construction plus solide, toutes choses étant égales d'ailleurs.

Les frais d'installation de la ligne sont évités ; par contre on a ceux d'achat des batteries et d'installation des bâtiments de charge avec les circuits électriques, les bancs de charge, les voies

de garage, les wagonnets, etc., frais que l'on peut estimer à 16 ou 20 000 *f* par voiture en service (en y comprenant la réserve d'accumulateurs nécessaire.)

En résumé, on voit que les frais de premier établissement par le système à accumulateurs sont à peu près les mêmes qu'avec l'emploi du fil aérien pour une intensité moyenne du trafic et un peu plus élevés aux trafics intenses nécessitant 3 ou 4 voitures en service par kilomètre exploité.

A titre de renseignements, nous donnons ci-après les frais de premier établissement de l'installation de Saint-Denis :

3 machines à vapeur Corliss	88 000 *f*	
3 chaudières semi-tubulaires.	48 000	
Tuyauterie, réservoirs, puits, pompes.	58 500	
Transmission.	37 000	
3 dynamos Desroziers.	43 500	
Fouilles, fumisterie, cheminées, etc, .	96 500	
Total (non compris les bâtiments).		371 500 *f*
44 batteries d'accumulateur	203 000	
Tableau de transmission, bancs de charge.	34 260	
(Non compris bâtiments, wagonnets et voies).		237 260 *f*
25 voitures à impériales équipées électriquement		425 000 *f*
Total.		1 033 760 *f*

Soit un peu plus de 60 000 *f* par voiture en service et environ 6 000 *f* par kilomètre-voiture effectué par heure.

Frais d'exploitation.

§ 53. — Continuons notre comparaison avec le système à fil aérien. Les frais d'exploitation par le système à accumulateurs différeront, toutes choses égales d'ailleurs :

1° Par la plus grande dépense de force motrice.

2° Par l'addition des frais de manutention, surveillance, entretien et renouvellement des batteries, déduction faite de l'entretien de la ligne aérienne.

Les dépenses sur tous les autres articles : personnel de conduite, entretien du matériel fixe et roulant, amortissements, etc., sont absolument les mêmes.

La puissance motrice absorbée est supérieure pour deux raisons :

1° Parce que le rendement total du système est plus faible.

2° Parce que le poids mort des voitures est beaucoup plus élevé (une fois et demie plus environ).

On peut estimer à 30 ou 35 0/0 le maximum du rendement que puisse permettre le système par accumulateurs entre le travail dépensé à la jante des roues et celui indiqué dans les cylindres à vapeur des moteurs fixes. Ce rendement est donc un peu inférieur à celui de la transmission électrique par fil aérien ; toutefois on peut estimer que la différence est compensée par la marche plus régulière des moteurs à vapeur et par la continuité du fonctionnement évitant les dépenses de combustible pour l'allumage des chaudières.

Il reste donc la différence provenant de l'augmentation du poids mort, d'où résultent non seulement une augmentation correspondante de tonnes-kilométriques à remorquer, mais encore une légère augmentation de la résistance par tonne (les essieux, les fusées devant être plus fortes donnent davantage de frottement).

En moyenne, on peut évaluer à 25 ou 30 0/0 en plus la consommation de combustible supplémentaire.

Voici d'après la Compagnie exploitante les résultats qui auraient été obtenus en 1893 sur les lignes de Saint-Denis à Paris et Neuilly :

Chevaux électriques-heure . .	1,38 *ch*	par kilom.-voiture.
Watt-heure de charge.	1015	—
Huile.	0,0036 *kg*	—
Consommation de combustible.	2,3 *kg*	
Effort de traction moyen . . .	170 *kg* par voiture.	

La consommation de combustible nous paraît faible, rapportée à des voitures de 13 à 14 *t* en service et nous ne la donnons que sous toutes réserves ; il en est de même pour la valeur moyenne de l'effort de traction.

On pourrait en déduire le rendement moyen du système. En évaluant à 1,1 *kg* la consommation par cheval-heure indiqué,

nous voyons que le kilomètre-voiture nécessite à l'usine une production de :

$$\frac{2,3}{1,1} \times 270\,000 \; kg = 564\,000 \; kgm.$$

Le travail aux jantes des roues serait de 170 000 *kgm.*

Le rendement ressortirait donc d'après ce calcul à près de 30 0/0.

Les frais de manutention, entretien et renouvellement des batteries sont très considérables.

Les frais de manutention pour le chargement des batteries peuvent s'évaluer à environ 0,015 *f* à 0,025 *f* par kilomètre-voiture.

Les frais d'entretien et de renouvellement des batteries sont peu connus, mais on peut se faire une idée des derniers de la manière suivante : il paraît établi que les plaques positives doivent être remplacées en moyenne après un parcours de 15 à 20 000 *km* et que les plaques négatives durent environ le quadruple.

Dans l'installation de Saint-Denis, le poids des plaques positives de chaque voiture est d'environ 1 200 *kg.*

Celui des plaques négatives est d'environ 800 *kg.*

En évaluant les frais de renouvellement à 1,25 *f* le kilogramme de plaque, le prix du kilomètre-voiture est grevé de ce seul chef de 0,10 *f* à 0,11 *f*, non compris les frais de surveillance et entretien.

On peut donc estimer de 0,14 *f* à 0,16 *f* par kilomètre-voiture la plus-value des frais d'exploitation qui résultera de ce chef avec l'emploi des accumulateurs. Cette dépense considérable, qui n'a aucune compensation, constitue le point faible du système.

§ 54. — Ci-après nous donnons les résultats d'exploitation pendant l'année 1893 des lignes de Saint-Denis à Neuilly et Paris :

Production de force motrice. . . .	0,1841 *f*	par kil.-voiture.
Personnel de conduite.	0,0788	—
Entretien des trucks et des moteurs.	0,0918	—
Dépenses diverses	0,0090	—
Frais généraux	0,0133	—
Entretien et manutention des accumulateurs.	0,1652	—
TOTAL.	0,5422 *f*	par kil.-voiture.

Nombre de kilomètres-voitures parcourus : 803 293.

Soit **47 200** par voiture en service et environ **20 000** par kilomètre de ligne.

A Birmingham, pendant l'année 1891, les résultats ont été les suivants :

Longueur de la ligne : 4 800 *m*. Nombre de voitures-kilomètres : **221 434**.

Personnel pour la traction et l'usine fixe	0,165 *f*	par kilom.-voiture.
Combustible et eau.	0,112	—
Entretien du matériel fixe . . .	0,065	—
Entretien du matériel roulant. .	0,125	—
Dépenses diverses	0,0060	—
Total.	0,473 *f*	par kilom.-voiture.

Ces chiffres sont comme on voit très élevés; ils ne comprennent cependant aucun amortissement ni pour le matériel fixe, ni pour le matériel roulant.

CHAPITRE II

Traction par l'air comprimé.

§ 55. — Ce système rentre dans le même ordre d'idées que le précédent, la seule différence provenant de ce que l'agent de transformation et d'accumulation de l'énergie est l'air comprimé au lieu d'être l'électricité. Le principe est absolument le même.

Les premiers essais d'application de l'air comprimé à la traction mécanique sont dus à M. Andraud. Ils ne donnèrent pas de résultats pratiques par suite des difficultés que donnait le refroidissement intense de l'air pendant sa détente, difficultés qui ne purent être surmontées par cet inventeur.

M. Mékarsky eut une plus saine appréciation du rôle qu'on devait faire jouer à l'air comprimé; il se rendit compte que l'air comprimé ne devait être considéré que comme un agent de transformation de chaleur en travail et que la chaleur nécessaire à la production du travail sur les pistons devait être empruntée non pas à la faible chaleur interne de cet agent de transformation, mais à une source d'énergie étrangère. En d'autres termes il fallait chauffer l'air avant de le détendre et l'un des moyens les plus simples pour atteindre ce but est celui qu'il adopta en incorporant à l'air destiné à travailler dans les cylindres une certaine proportion de vapeur d'eau dont la condensation au fur et à mesure de la production du travail extérieur fournit l'énergie nécessaire à la production de ce travail. Tel est, en principe, le système bien connu sous lequel l'emploi de l'air comprimé s'est répandu, et dont il a été assez souvent question dans cette enceinte pour que nous n'ayons pas à nous y étendre beaucoup. Nous nous contenterons de rappeler ce qui concerne son application à la traction mécanique des tramways.

§ 56. — Dans ce système les voitures à voyageurs peuvent être soit automobiles soit remorquées par une locomotive spéciale,

suivant les cas, les distances à parcourir et l'intensité du trafic. Dans les deux cas elles fonctionnent au moyen d'un approvisionnement d'air comprimé emprunté périodiquement par elles à un établissement fixe et emmagasiné dans des réservoirs en tôle d'acier.

Dans les automobiles, ces réservoirs sont suspendus sous un truck métallique, sur lequel repose la caisse de la voiture à voyageurs.

Dans les locomotives, ils occupent la place de la chaudière à vapeur dont ils tiennent lieu.

En dehors de cet approvisionnement d'air comprimé, la machine emporte une certaine quantité d'eau chaude dans un réservoir nommé bouillotte, rempli aux trois quarts environ et qui est placé sur le parcours que doit suivre l'air comprimé pour se rendre aux cylindres moteurs.

Cette bouillotte caractérise le système Mékarsky, et forme la base des modifications que cet inventeur a fait subir à l'emploi de l'air comprimé.

L'air arrivant à la partie inférieure de ce réservoir, traverse la colonne liquide en s'échauffant et se saturant de vapeur d'eau, puis traverse un détendeur qui amène automatiquement le mélange fluide à la pression qu'il doit avoir à l'admission dans les cylindres. Le mécanicien peut facilement régler cette pression à chaque instant suivant l'effort de traction à développer, ce qui donne à ce système une souplesse et une élasticité supérieures de beaucoup à celles du précédent système de traction et permet de franchir aisément de fortes rampes ou de remorquer de fortes charges.

Pour conserver jusqu'à la fin du trajet cette élasticité de puissance, les réservoirs d'air sont divisés de manière à constituer deux batteries distinctes ayant chacune leur tuyauterie indépendante; l'une pour la marche ordinaire; l'autre, dite de réserve, pour les coups de collier à donner vers la fin du parcours. Cette disposition a été partout adoptée malgré la petite complication qui en résulte.

Lorsqu'une locomotive ou une automobile ont épuisé leur provision d'air comprimé et de vapeur, elles doivent revenir à l'usine fixe pour la renouveler avant d'effectuer un nouveau parcours.

Usine centrale.

§ 57. — Cette usine fixe comporte essentiellement :

1° Un ensemble de générateurs et de moteurs à vapeur pour la production de l'énergie.

2° Un nombre correspondant de compresseurs d'air à haute pression.

3° Une batterie de réservoirs en tôle d'acier où s'emmagasine l'air refoulé par les compresseurs.

4° Toute une tuyauterie spéciale pour la charge d'air comprimé et de vapeur dans les locomotives et automobiles.

Les moteurs à vapeur peuvent, bien entendu, être remplacés par des turbines hydrauliques.

La production de la force motrice ne présente aucune particularité saillante et se fait dans des conditions analogues à celles des autres stations centrales. On doit naturellement tout disposer pour la produire dans les meilleures conditions économiques possibles ou compatibles avec les données de l'installation.

Les compresseurs effectuent la compression de l'air en général en deux reprises par suite de pressions élevées de refoulement qui ont varié de 30 à 50 *atm* dans les installations déjà existantes et ont été encore sensiblement augmentées dans les installations récentes.

Chaque compresseur est muni d'une injection d'eau pulvérisée qui a pour effet de réduire considérablement la température de l'air comprimé à sa sortie du cylindre. Le deuxième cylindre est en outre muni d'une enveloppe à circulation d'eau. Entre les deux compressions, l'air est envoyé dans un réservoir intermédiaire où il achève de se refroidir, et après la deuxième compression, dans un réservoir sécheur où il se débarrasse de l'excès d'humidité entraînée. Il est ensuite emmagasiné dans une batterie de réservoirs en tôle d'acier, nommés accumulateurs. En effet, ces réservoirs jouent un rôle analogue à celui des gazomètres des usines à gaz et des accumulateurs des installations hydrauliques; ils servent de volant entre la production continue de l'air comprimé et son utilisation discontinue. La pression maximum y est réglée au moyen d'appareils de sûreté.

Pour renouveler la provision d'un moteur, on l'amène dans la salle de chargement où ses réservoirs sont mis en communication par une tuyauterie convenablement disposée avec les accumulateurs dont ils reçoivent la plus grande partie de leur chargement d'air comprimé. Le complément est fourni directement par les compresseurs d'air que l'on met en communication à la fin de l'opération avec les réservoirs de la voiture ou de la locomotive. Aussitôt que la pression est arrivée dans ces derniers à la valeur fixée, un appareil automatique coupe la communication avec les réservoirs de voitures et l'établit avec la batterie d'accumulateurs où l'air débité par les compresseurs continue à s'emmagasiner.

Pendant que s'effectue le chargement des réservoirs d'air comprimé, la bouillotte à eau chaude est mise en communication avec les générateurs de vapeur qui ramènent sa température et sa pression au taux nécessaire pour le service.

Le prix de ce matériel fixe : chaudières, moteurs, compresseurs, réservoirs, tuyauteries et appareils divers constitue une fraction très importante du coût total d'installation de la ligne de tramway.

Matériel roulant

§ 58. — Les automobiles ont plus particulièrement été employées dans les différentes installations de traction par l'air comprimé. Nous ne parlerons donc que de celles-là. D'ailleurs tout ce que nous dirons sur leur mode de fonctionnement s'applique à peu près intégralement à celui des locomotives.

Ainsi que nous l'avons dit, le châssis porte sous la caisse de la voiture les réservoirs en nombre variable où s'accumule l'air comprimé. Ces réservoirs ont de 0,500 *m* à 0,600 *m* de diamètre et la pression admise varie de 30 à 50 *atm* (30 *atm* à Nantes et de 45 à 50 aux tramways Nogentais).

La bouillotte est disposée verticalement à la partie antérieure du truck; elle est surmontée du régulateur de pression ou détendeur qui sert au mécanicien à régler à volonté la pression du mélange d'air et de vapeur admis dans les cylindres. La distribution est maintenue autant que possible fixe et c'est au moyen du régulateur de pression que le mécanicien fait varier l'effort de traction suivant la résistance du profil et les charges à remorquer. Trois manomètres lui indiquent constamment la pression dans chacune des deux batteries de réservoirs et dans la boite à tiroir; il a sous

la main les appareils de commande des freins, le régulateur de détente et le levier de changement de marche.

C'était un problème peu facile à résoudre que d'arriver à condenser dans un espace disponible aussi étroit, les appareils moteurs, les appareils de suspension du châssis, les organes de réglage et de sécurité, les réservoirs d'air comprimé, d'eau chaude avec toute la tuyauterie et les accessoires nécessaires, et de faire de l'ensemble une voiture automobile apte à circuler sur une voie ferrée du genre des voies de tramway.

Ce problème a été résolu, mais au prix de quelques petits inconvénients inévitables avec l'emploi des automobiles. Les appareils multiples trop groupés et resserrés sont d'une surveillance et d'un entretien un peu difficiles; d'autre part la voiture doit être assez allongée afin d'avoir une capacité convenable et son empattement est réduit par la nécessité d'accoupler les essieux et de les rapprocher pour leur permettre de s'incrire aisément dans les courbes. Il en résulte des porte-à-faux considérables, supportant à leurs extrémités des poids considérables : bouillotte, réservoirs d'air et cylindres moteurs. Aussi la voiture doit-elle être très solidement constituée.

Comme elles présentent un grand moment d'inertie par rapport à leur axe transversal il peut en résulter en service des mouvements de tangage prononcés qui sont de nature à éprouver la voie, quand elle n'est pas assez solidement établie.

Ces inconvénients n'existent pas dans les locomotives où les conditions de bon équilibre des poids peuvent être bien mieux satisfaites.

Applications.

§ 59. — Des applications de l'air comprimé à la traction mécanique des tramways ont été faites à Nantes, aux environs de Paris et à Berne.

Le réseau actuellement exploité à Nantes se compose de deux lignes, l'une de 6144 *m* de longueur, desservant les quais de la Loire, l'autre de 2250 *m* traversant plusieurs bras de la Loire et reliant les faubourgs de la ville gauche au centre de la ville.

La rampe maxima est de 45 *mm* par mètre, mais la plus grande partie du réseau est de niveau.

Le matériel roulant comprend 22 petites automobiles sans impériale à 32 places et 4 voitures à impériale de 46 places pouvant

être au besoin remorquées par les premières. L'exploitation se fait avec seize voitures les jours de semaine et 20 le dimanche. Depuis leur inauguration en 1879, ces tramways ont fonctionné d'une manière très satisfaisante et avec une économie remarquable.

§ 60. — Le réseau dit des « Chemins de fer Nogentais » constitue la deuxième application du système de traction Mékarsky. Ce réseau suburbain se compose de la ligne de Vincennes à Ville-Évrard par Nogent, longue de 9 600 *m* et d'un embranchement de Nogent à Bry-sur-Marne. Le profil de ces lignes est assez accidenté, surtout à la traversée de Nogent où les rampes atteignent 47 *mm* par mètre, avec des courbes et des contre-courbes nombreuses et de faible rayon. La voie est très bien établie; partie (6 550 *m*) en rails saillants sur accotement de route et partie (5 150 *m*) à la traversée des villages en rails à ornières sur chaussée. Il y a deux usines de charge, l'une au dépôt de la Maltournée, l'autre à la tête de ligne de Vincennes.

Les automobiles ont été employées de préférence à des remorqueurs, ce qui a été peut-être un tort; elles pèsent 10 à 11 *t* à vide et 14 *t* avec leur chargement complet de voyageurs. Il y a aussi quelques voitures à voyageurs qui sont attelées en remorque les jours de grande affluence.

Le fonctionnement de cette ligne n'a pas donné lieu à objections depuis son ouverture.

§ 61. — L'installation de Berne comporte une petite ligne d'environ 3 000 *m* de longueur à voie de 1 *m*, avec d'assez fortes rampes atteignant jusqu'à 52 *mm* par mètre. La puissance motrice est empruntée à une chute d'eau.

Les automobiles de trente places, très légères et sans impériale ne pèsent pas plus de 7 *t* à vide; elles ont leurs essieux couplés et peuvent au besoin remorquer de petites voitures ordinaires sans impériale à 25 places.

§ 62. — Des applications beaucoup plus importantes de l'air comprimé à la traction mécanique des tramways vont être prochainement inaugurées à Paris.

Le succès de l'installation de Nantes a décidé la Compagnie générale des Omnibus de Paris à substituer la traction mécanique par l'air comprimé à la traction animale, sur les trois lignes suivantes :

1° Du Louvre à Saint-Cloud. Longueur 10135 *m*;

2° Du Louvre à Sèvres et à Versailles. Longueur 19000 *m*;

3° Du cours de Vincennes à Saint-Augustin. Longueur 9140 *m*.

Les deux premières lignes seront avec beaucoup de raison exploitées au moyen de trains remorqués par locomotives; la troisième qui traverse les régions populeuses de Paris sera exploitée par automobiles.

Il y aura en tout trois usines de charge: une grande à Boulogne-sur-Seine, et deux autres de moindre importance rue de Lagny et à la Villette.

Nous ne reviendrons pas sur la description de ces installations dont la Société a déjà été entretenue et dont l'auteur se réserve de communiquer en leur temps les résultats d'essai. Nous nous contenterons de faire ressortir les deux nouveautés intéressantes qu'elle présente et qui ne manquent pas d'une certaine hardiesse :

1° L'emploi de canalisations d'air comprimé à haute pression pour le rechargement à grande distance des locomotives : canalisation de 2.100 *m* entre le dépôt de Boulogne et la porte du Point-du-Jour; canalisation de 4200 *m* entre le même dépôt de Boulogne et celui de Sèvres sur la route de Versailles.

Ces conduites de 60 *mm* de diamètre sont faites en tuyaux soudés à recouvrement avec joints au plomb.

2° L'adoption de très hautes pressions de chargement qui ont été prévues de 80 *atm*, afin de permettre de franchir de plus longs parcours entre deux charges.

Ces énormes pressions abordées pour la première fois ont nécessité des dispositions spéciales pour assurer la résistance et l'étanchéité des organes, sans accroître outre mesure le poids mort.

Les réservoirs des voitures sont en tôles d'acier embouties, sans autre rivure que celle d'un des fonds; le joint correspondant à cette rivure unique a été tourné pour avoir un contact parfait et les rivets ont été fraisés pour donner une étanchéité complète à la rivure.

L'épaisseur de ces tôles d'acier est de 13,5 *mm* seulement, pour un diamètre intérieur d'environ 0,500 *m*. Ces tôles travailleront donc à plus de 14 *kg* par millimètre carré. Elles sont faites avec un métal d'une qualité exceptionnelle ayant donné aux essais : 55 *kg* de résistance par millimètre carré à la rupture, 28 *kg* de limite d'élasticité et 22 0/0 d'allongement.

Les accumulateurs des usines fixes sont faits du même métal; ils n'ont pas de rivure longitudinale; les deux extrémités de chaque virole sont soudées à recouvrement et les fonds seuls sont rivés.

Le métal des bouillottes est plus doux : 38 *kg* de résistance à la rupture et 30 0/0 d'allongement; aussi l'épaisseur des tôles est-elle proportionnellement plus forte.

Ces dispositions rempliront-elles leur but et assureront-elles la résistance avec une étanchéité satisfaisante sous ces fortes pressions? C'est ce que l'expérience d'une exploitation continue montrera prochainement.

Les voitures automobiles à 50 places pèsent environ 11 *t* à vide dont 8 500 pour le truck et tout le mécanisme. Les réservoirs d'air d'une capacité de 2 400 *l* à 80 *atm* ne pèsent pas plus de 2 800 *kg* grâce à l'excellence du métal employé.

Le prix du truck avec tout le mécanisme et les réservoirs est de 20 000 *f*.

§ 63. — Les appareils de compression ont été établis avec tous les derniers perfectionnements permettant d'obtenir le maximum d'effet utile avec la moindre dépense.

Les machines à vapeur, compound, commandent directement des compresseurs à triple compression. Ces compresseurs verticaux comportent quatre cylindres : les deux inférieurs à simple effet aspirent l'air extérieur et le refoulent dans les deux autres qui le compriment successivement jusqu'à la pression définitive.

Les soupapes d'aspiration et de refoulement sont horizontales et chaque compresseur est muni d'une injection d'eau pulvérisée opérant le refroidissement de l'air comprimé à sa sortie de chacun des cylindres.

La consommation de vapeur des machines motrices a été garantie à 7 *kg* par cheval indiqué, ce qui permet d'espérer obtenir une production d'un kilogramme d'air par deux kilogrammes de vapeur.

Rendement du système.

§ 64. — L'emploi de l'air comprimé comme agent de transmission de la puissance motrice entraîne à des pertes considérables, surtout à de telles pressions. Cette importante question a été si souvent débattue et a été l'objet de si vives controverses, de tant d'exagérations dans un sens et dans l'autre, que nous avons cru

utile de chercher à l'établir au moyen de calculs qui comportent une précision aussi grande qu'il est utile dans un pareil sujet et qui sont d'ailleurs appuyés sur des résultats d'expérience.

Afin d'apprécier avec exactitude l'ensemble des faits, il faut évidemment se rendre compte :

1° Du travail absorbé par la compression d'un kilogramme d'air;

2° Du travail restitué par la détente dans les cylindres moteurs de ce même kilogramme d'air comprimé.

Travail de compression d'un kilogramme d'air.

§ 65. — La compression se fait en plusieurs reprises successives avec refroidissements intermédiaires; on peut supposer la compression adiabatique dans chaque cylindre et l'air ramené à la même température initiale à chaque admission.

Avec deux et surtout trois compressions successives le diagramme définitif ainsi obtenu se rapprochera beaucoup de la courbe isothermique.

Si l'on désigne par T_1, T_2, T_3, etc... les températures d'entrée de l'air et par δ_1, δ_2, δ_3..... les valeurs des compressions dans chaque cylindre, le travail théorique total sera donné par l'expression :

$$\mathfrak{T}^c = 100{,}5\,[T_1(\delta_1^{0,29} - 1) + T_2(\delta_2^{0,29} - 1) + T_3(\delta_3^{0,29} - 1) + \ldots..$$

Avec $\delta_1\,\delta_2\,\delta_3, \ldots.. = \Delta$ rapport de compression finale.

Les conditions de fonctionnement sont les meilleures quand toutes les compressions successives ont la même valeur, les températures initiales étant les mêmes. Alors :

$$\mathfrak{T}_c = 201\ T\left(\Delta^{\frac{0,29}{2}} - 1\right) \text{ dans le cas de la double compression.}$$

$$\mathfrak{T}_c = 301{,}5\ T\left(\Delta^{\frac{0,29}{3}} - 1\right) \text{ dans le cas de la triple compression.}$$

Nous avons fait le calcul en supposant successivement $\Delta = 30$, 50 et 80 et avons obtenu les résultats suivants pour $T = 17°$ centigrades.

Double compression	$\Delta = 30$ $\mathfrak{T}_c = 37\,300$	*kgm.*
	$\Delta = 50$ $\mathfrak{T}_c = 44\,400$	—
Triple compression	$\Delta = 80$ $\mathfrak{T}_c = 46\,100$	—

Il est intéressant de comparer ces chiffres avec ceux que donneraient les hypothèses de la compression entièrement adiabatique ou entièrement isothermique.

VALEURS DE Δ	COMPRESSION ADIABATIQUE	COMPRESSION ISOTHERMIQUE	COMPRESSION ÉTAGÉE
	kgm	*kgm*	*kgm*
$\Delta = 30$	49 300	28 900	37 300
$\Delta = 50$	61 400	33 200	44 400
$\Delta = 80$	74 600	37 200	46 100

En réalité on n'obtient pas dans les compresseurs le diagramme théorique supposé par suite des espaces nuisibles, des pertes de charge, etc...; les résistances passives interviennent encore pour augmenter le travail véritable de compression de l'air. Dans de bonnes machines bien réglées on peut admettre un rapport de 75 0/0 entre le travail théorique donné par les formules précédentes et le travail effectif dans le cas de la double compression et de 70 0/0 dans le cas de la triple compression.

En appliquant ces coefficients nous obtenons les résultats suivants :

Double compression $\begin{cases} \Delta = 30 \ \mathfrak{E}_c = 49\,700 \ \textit{kgm}. \\ \Delta = 50 \ \mathfrak{E}_c = 59\,200 \ — \end{cases}$

Triple compression $\Delta = 80 \ \mathfrak{E}_c = 66\,000 \ —$

On voit qu'en chiffres ronds, un cheval-vapeur effectif donne :

4 *kg* d'air à la pression de 80 *atm*.
4,5 *kg* d'air à la pression de 50 —
5,5 *kg* d'air à la pression de 30 —

Ces résultats sont d'accord avec ceux que la pratique aurait donnés à M. Mékarsky.

Travail de détente.

§ 66. — Nous avons vu que l'air comprimé des réservoirs avant d'être admis dans les cylindres passe dans la bouillotte où il s'échauffe et s'imprégne de vapeur en quantité suffisante pour pouvoir se détendre ensuite sans refroidissement notable.

La proportion minima de vapeur nécessaire pour fournir par sa condensation une quantité de chaleur équivalente au travail de détente d'un kilogramme d'air serait d'environ 6 0/0 correspon-

dant à un rapport de pression des deux fluides d'environ 0,10. Mais on a intérêt à augmenter sensiblement cette proportion et à porter le rapport de pression à 0,15 ou 0,13 au moins.

Le volume d'eau de la bouillotte est calculé en rapport avec l'approvisionnement d'air comprimé de façon que cette proportion reste à peu près la même pendant tout le trajet

Avec un rapport de 0,14 et une pression initiale de 50 *atm*, la pression initiale de l'eau chaude doit être de 7 *atm*, correspondant à une température de 165°.

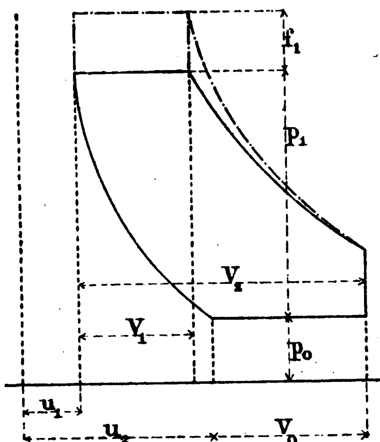
A la pression finale de 7 *kg* dans les réservoirs la pression de la vapeur d'eau dans la bouillotte doit être d'une atmosphère et sa température de 100°.

Par suite, la température du mélange fluide à la sortie de la bouillotte ira en s'abaissant de 165° à 100°.

Pendant la détente, la température de ce mélange s'abaissera forcément un peu, une certaine proportion de ce travail de détente devant être empruntée à la chaleur interne propre de l'air pour que la condensation puisse se produire. Toutefois avec une proportion de vapeur de 14 0/0, cette chute de température ne dépassera pas 50°.

Pour ne pas compliquer inutilement les calculs nous avons supposé la température constante pendant la détente et égale à 100° centtigrades.

Nous avons évalué séparément le travail dû à l'air et celui dû à la vapeur, en négligeant le très petit travail de détente que donne celle-ci.



La distribution est généralement réglée par une coulisse Walshaert, qui donne d'excellentes distributions; le cran de détente est, en général, conservé fixe, la pression d'admission variant seule et les conditions de la distribution sont à peu près les suivantes :

Admission, 30 0/0. Avance à l'échappement, 25 0/0. Détente, 45 0/0. Compression, 35 0/0. Espaces nuisibles, 7 0/0.

Le travail indiqué est à peu près représenté par le diagramme ci-contre et sa valeur est donnée par l'équation :

$$\mathfrak{T} = V_1 p_1 + V_1 f_1 + \int_{V_1}^{V_2} p dV - p_0 V_0 - \int_{u_2}^{u_1} p du$$

avec
$$\begin{cases} V_1 = 0{,}30 \text{ V} & \text{(V, volume du cylindre).} \\ V_2 = 0{,}75 \text{ V} & \\ V_0 = 0{,}40 \text{ V} & f_1 = 0{,}14\, p_1 \\ u_2 = 0{,}35 \text{ V} & \\ u_1 = 0{,}07 \text{ V} & p_0 = 1{,}2\, kg \text{ par centimètre carré.} \end{cases}$$

Quant au poids d'air débité, il est donné, en supposant sa température égale à 100° centigrades, par :

$$\pi = 0{,}0000916 \left((V_1 + u_1)\, p_1 - u_2 p_0\right)$$

Et le travail de détente par kilogramme d'air est donné par :

$$\mathfrak{T}_d = \frac{\mathfrak{T}}{\pi}.$$

Nous avons fait les calculs en supposant successivement $p_1 = 7$ *kg*, 10 *kg* et 15 *kg* et avons trouvé les résultats consignés dans le tableau ci-joint

PRESSION INITIALE	$\frac{T}{V}$	$\frac{\pi}{V}$	$\frac{T}{\pi}$
kg	*kgm*	*kg*	*kgm*
$p_1 =$ 70 000	32 160	1,86	17 350
$p_1 =$ 100 000	51 240	2,82	18 300
$p_1 =$ 150 000	83 040	4,43	18 700

La valeur de $\frac{\mathfrak{T}}{\pi}$ est donnée par la formule :

$$\mathfrak{T} = \frac{0{,}636\, p_1 - 12360}{0{,}0000321\, p_1 - 0{,}385} = \frac{p_1 - 19100}{p_1 - 12000} \times 19\,810 \; kgm.$$

§ 67.— De ces calculs ressort un premier résultat important, c'est que l'utilisation de l'air est à peu près indépendante de la pression d'admission entre les limites généralement admises pour celle-ci.

Quant aux chiffres trouvés pour la valeur du travail indiqué, ce sont évidemment des maximums :

1° Parce que le diagramme théorique n'est jamais réalisé, les pertes de charge intervenant pour arrondir les angles, diminuer

les ordonnées, déterminer des travaux résistants sensibles pendant la période d'avance à l'échappement, etc...

2° Parce que la distribution n'est pas constamment réglée au même cran et que pendant le parcours on réalise d'autres distributions donnant un effet utile sensiblement moindre.

Pour ces diverses raisons, on peut tout au plus espérer réaliser en travail indiqué les 9/10 de ce qui résulte de nos calculs théoriques. Il en ressort une utilisation maxima de 16 000 *kgm* indiqués dans les cylindres moteurs par kilogramme d'air.

Bien entendu, les résistances passives du mécanisme viennent diminuer ces résultats, de telle sorte que le travail disponible sur l'essieu par kilogramme d'air est encore moindre et réduit de 20 0/0 environ, soit 12 500 à 13 000 *kgm*.

Il serait intéressant de contrôler ces résultats au moyen de mesures dynamométriques effectuées sur les automobiles et remorqueurs appelés à fonctionner bientôt à Paris.

D'après nos calculs, le rendement avec l'emploi de l'air comprimé ressortirait à environ 25 0/0 entre le travail *indiqué* dans les cylindres moteurs de la voiture et le travail *effectif* développé par les machines fixes ;

A environ 20 ou 22 0/0 entre le travail *indiqué* dans les cylindres à vapeur de l'usine fixe et le travail *indiqué* dans les cylindres du moteur.

Ces chiffres supposent, bien entendu, une étanchéité parfaite de tous les organes : compresseurs, accumulateurs, réservoirs, tuyauterie, etc., étanchéité que l'on a pu assurer d'une manière satisfaisante aux pressions employées jusqu'à ce jour, de 30 à 50 *atm*. Si elle n'était pas bien assurée, le rendement pourrait être très sensiblement affaibli.

§ 68. — De tout ceci, il résulte que le rendement de l'air comprimé est faible ; il ne faut, toutefois, pas perdre de vue que la force motrice peut être obtenue à l'usine fixe dans les meilleures conditions économiques possibles, ce qui remédie dans une grande mesure à ce grave défaut.

Nous avons vu que, dans de bonnes conditions, avec des chaudières et des moteurs fixes économiques, un kilogramme de vapeur donnait 1/2 *kg* d'air comprimé.

Par suite, un kilogramme de vapeur dépensé à l'usine permettra d'obtenir 8 000 *kgm* indiqués dans les cylindres moteurs de la voi-

ture, ce qui correspond à une dépense de 34 *kg* de vapeur par cheval indiqué dans les cylindres moteurs, non compris la petite quantité de vapeur dépensée par la bouillotte.

Poids mort de l'automobile et dépense de force motrice

par kilomètre-voiture.

§ 69. — L'automobile de 50 places pèse environ 10,5 *t* à vide, ainsi réparties :

Caisse.	2 000 *kg*
Réservoirs et bouillotte	3 000 *kg*
Châssis et mécanisme.	5 500 *kg*

L'approvisionnement d'air disponible est d'environ 200 *kg*, soit une proportion de 15 *kg* de réservoirs par kilogramme d'air.

Cette proportion qui était auparavant de 22 à 25 *kg* a pu être sensiblement réduite sur les nouvelles automobiles grâce à l'excellence du métal employé pour les réservoirs, permettant de porter le coefficient de travail de 9 ou 10 *kg* par millimètre carré à 14 ou 15.

En ordre de service, l'automobile pesera 14 *t*. La résistance en palier peut être évaluée à au moins 12 *kg* par tonne.

L'effort de traction en palier sera donc d'environ 168 *kg*. L'effort moyen en service sera sensiblement plus grand par suite de la résistance due aux courbes, aux rampes et du travail perdu aux arrêts. En évaluant ces résistances à 4 *kg* par tonne (ce qui correspond à un profil assez facile), le travail kilométrique moyen de l'automobile sera de :

$$16 \times 14 \times 1\,000 = 224\,000 \; kgm$$

correspondant à une dépense d'air comprimé de 14 *kg* par kilomètre-voiture, à une dépense de vapeur de 28 *kg* et à une consommation de combustible d'environ 4 *kg* par kilomètre-voiture. Le rayon de parcours de la voiture serait d'environ 15 *km*.

§ 70. — Nous ferons remarquer qu'il a été souvent pensé et dit que l'emploi des automobiles était préférable à celui des locomo-

tives en ce qu'il permettait un poids mort plus faible par place offerte.

C'est là une erreur, sauf quand le profil est accidenté et présente de très fortes rampes.

En effet, une voiture automobile de 50 places pèse à vide 10 500 *kg*, soit 210 *kg* par place offerte.

Si on la suppose remorquer une autre voiture de 50 places pesant 3 500 *kg* à vide (ce qui en pratique se fait rarement), le poids mort ressort à 140 *kg* par place offerte.

D'autre part, une locomotive de 12 *t* peut aisément enlever.

2 voitures à 50 places sur des rampes de 50 *mm*, soit 190 *kg* par place offerte;

3 voitures à 50 places sur des rampes de 33 *mm*, soit 150 *kg* par place offerte, tout en permettant des parcours, à poids mort égal, au moins égaux à ceux des automobiles, en donnant plus d'élasticité au service et en fatiguant moins la voie.

C'était, d'ailleurs, presque à prévoir, car le poids mort des mécanismes et des accessoires ne varie pas dans de grandes limites et celui des réservoirs est mieux utilisé à cause de leur plus grande longueur et en rapport direct avec la puissance emmagasinée.

Il nous semble donc que l'emploi des locomotives doit être préféré toutes les fois que les conditions le permettent et en particulier pour les trajets de banlieue et interurbains ou même les lignes urbaines desservant de larges voies de communication.

Frais de premier établissement

§ 71. — Ces frais comprennent :

1° L'achat de la partie du matériel roulant nécessaire pour opérer la traction ;

2° L'installation de l'usine fixe de chargement.

Matériel roulant.

§ 72. — On peut employer à la traction soit des automobiles, soit des locomotives.

Dans les deux cas, ce matériel n'est pas constamment utilisé, comme dans les systèmes précédents ; il y en a toujours une certaine fraction en rechargement à l'usine fixe ; ces rechargements qui se succèdent à intervalles assez fréquents absorbant de 15 à 20 0/0 de la durée totale du service de chaque automobile ou locomotive. Aussi, pour la même circulation, le même parcours kilométrique journalier et la même vitesse de régime, on devra mettre en service 15 à 20 0/0 d'automobiles ou de locomotives en plus qu'avec les systèmes à fil aérien ou à accumulateurs, sans préjudice du supplément nécessaire pour les réserves et les réparations.

Aussi, en moyenne, pour 10 automobiles ou locomotives en circulation, on doit en avoir au total au moins 15, dont 2 en rechargement et 3 en réserve ou en réparations, c'est-à-dire une fois et demie davantage.

D'autre part, nous avons dit plus haut que la valeur du châssis d'une automobile, avec les réservoirs, le mécanisme et toute la tuyauterie et appareils accessoires nécessaires, était d'environ 20 000 *f*, ce prix s'appliquant, bien entendu, à de grandes automobiles de 50 places, type de la ville de Paris.

Si l'on déduit de ce chiffre la valeur du châssis de voiture ordinaire, on voit que la dépense afférente à la traction pour une automobile de ce genre peut être estimée à 17 000 ou 18 000 *f*.

D'autre part, une locomotive susceptible de remorquer deux ou trois voitures de 50 places sur un parcours de 15 à 20 *km* coûte de 30 000 à 35 000 *f*, soit 2 *f* à 2,50 *f* le kilogramme.

Par suite, les frais du matériel roulant, en ce qui concerne spécialement la traction, peuvent s'évaluer à : 27 000 ou 28 000 *f* par automobile de 50 places en circulation et à 45 000 ou 50 000 *f* par locomotive de 15 à 18 *t* en circulation.

Ces chiffres ressortent à peu de chose près des installations en cours d'exécution à Paris.

Ainsi, pour avoir 15 locomotives en circulation sur les lignes du Louvre à Saint-Cloud, Sèvres et Versailles, la Compagnie Générale des Omnibus en a acheté 23 coûtant ensemble 805 000 *f*,

d'où ressort une dépense, par locomotive en circulation, de *53 000 f*. (Ces locomotives sont des machines à 3 essieux, pesant 18 *t* et pouvant effectuer 20 *km* d'une traite.)

En second lieu, pour avoir 16 automobiles en circulation sur la ligne de Vincennes-Saint-Augustin, elle en a acheté 24, coûtant ensemble 440 000 *f* d'aménagement mécanique, d'où ressort une dépense, par automobile en circulation, de *27 500 f*.

Il est intéressant de rapporter ces chiffres au parcours kilométrique à effectuer par heure.

Ce parcours est en moyenne de 10 *km* par automobile en circulation et de 20 *km*-voitures, par locomotive en circulation, en supposant que chaque locomotive remorque en moyenne deux voitures.

La dépense de matériel roulant qui en résulte par kilomètre-voiture à effectuer par heure est :

De 2 700 à 2 800 *f* avec l'emploi d'automobiles indépendantes;
De 2 300 à 2 500 *f* avec l'emploi de locomotives.

En particulier, pour les installations de Paris, ces chiffres sont de :

3 300 *f* par kilomètre-voiture-heure sur la ligne du Louvre-Versailles ;

2 800 *f* par kilomètre-automobile-heure sur la ligne Vincennes-Saint-Augustin.

Installations fixes.

§ 73. — L'usine de chargement doit comprendre : chaudières, moteurs, compresseurs, réservoirs, tuyauterie et accessoires, le tout revenant, y compris les bâtiments, à 7 ou 800 *f* par cheval-vapeur pour des installations d'importance moyenne, soit environ 180 à 200 *f* par kilogramme d'air pouvant être débité par heure.

Or, chaque kilomètre d'automobile de 50 places en absorbe 13 ou 14 et nécessite une installation permettant, avec les réserves indispensables, d'en débiter 25 à 35 0/0 en plus, soit en moyenne 18 *kg* d'air.

Les frais d'établissement de l'usine centrale ressortent donc à environ 3 500 *f* par kilomètre d'automobile à effectuer par heure, soit 35 000 *f* par automobile en circulation.

Dans le cas de la traction par locomotives, les frais approxi-

matifs peuvent s'apprécier de la même façon en prenant pour base qu'un train absorbe 1 *kg* d'air par tonne kilométrique de locomotive, 0,700 *kg* par tonne kilométrique de train et nécessite une installation permettant d'en produire de 30 à 35 0/0 en plus. La dépense installation peut donc s'estimer à 200 ou 220 *f* par tonne kilométrique de train à effectuer par heure.

Par exemple, les installations fixes de la ligne Louvre-Saint-Cloud-Sèvres et Versailles, coûtent environ 700 000 *f* pour un service horaire de 120 à 125 kilomètres-trains, de 240 kilomètres-voitures avec 15 trains en circulation.

En résumé, nous voyons que les frais de premier établissement concernant la traction par l'air comprimé peuvent s'estimer au total à :

60 000 *f* environ par automobile de 50 places en circulation;
100 000 *f* environ par train de 2 ou 3 voitures en circulation ;
5 000 à 7 000 *f* par kilomètre-voiture à effectuer par heure.

Ces chiffres sont sensiblement de même ordre que ceux trouvés pour les systèmes à fil aérien et à accumulateurs, la plus grande dépense de matériel roulant et de force motrice étant compensée par l'économie de la ligne et des batteries d'accumulateurs.

Frais d'exploitation.

§ 74. — Les frais d'exploitation des Chemins de fer Nogentais, en ce qui concerne la traction, ont été les suivants pendant l'exercice 1889 par voiture-kilomètre :

1° Frais de personnel	Personnel des dépôts . .	0,0736	
	Mécaniciens-conducteurs	0,0694	
			0,143
2° Combustible, graissage et eau			0,178
3° Entretien	Entretien du matériel fixe.	0,028	
	Entretien du matériel roulant . . .	0,052	
	Outillage et divers	0,008	
			0,088
	Total. . . Fr.		0,409

Nombre total de kilomètres-voitures : 233 841.

§ 75. — Les frais d'exploitation des tramways de Nantes, pendant l'exercice 1891, ont été les suivants :

1° Frais de personnel	Personnel des dépôts. . .	0,040	
	Mécaniciens-conducteurs.	0,061	
			0,101
2° Combustibles, eau et graissage			0,118
3° Entretien	Entretien du matériel fixe.	0,013	
	Entretien du matériel roulant . . .	0,058	
	Outillage et divers.	0,002	
			0,073
	Total. . . Fr.		0,292

Nombre de kilomètres-voitures : 682 852.

Les frais de traction à Nantes ont varié de 0,412 *f* le kilomètre-voiture à 0,265 *f*, depuis l'année 1879 à l'année 1892, le nombre annuel de kilomètres-voitures variant lui-même de 199 610 à 694 791.

La moyenne des dix dernières années est de 0,294 *f* le kilomètre-voiture. Il faut remarquer que les voitures de Nantes sont plus petites et plus légères que celles de Nogent, que la main-d'œuvre y est meilleur marché et le parcours kilométrique journalier plus grand. C'est ce qui explique la différence dans les résultats constatés.

Ces dépenses ne comprennent pas l'amortissement du matériel fixe et roulant. En supposant cet amortissement pratiqué en dix ans, ce qui est une limite raisonnable pour un matériel de ce genre, cet amortissement grèverait le kilomètre-voiture d'environ 0,10 *f* à 0,15 *f*. Cet amortissement est donc un facteur important du prix de revient et qu'il ne faut pas oublier de faire entrer en ligne de compte.

§ 76. — Le système à air comprimé nécessite des installations mécaniques importantes, et, ainsi que nous avons pu nous en rendre compte, son rendement est faible et sa consommation de combustible considérable. Par contre, c'est un des rares systèmes dont l'innocuité soit complète et dont l'emploi à l'intérieur des villes ne prête absolument à aucune critique. Il possède une grande élasticité qui lui permet de desservir des profils très accidentés et de se prêter à un trafic très irrégulier; il est sûr, propre, confortable, rapide et permet l'emploi facile d'automobiles et de locomotives selon les circonstances.

Enfin, dans certaines conditions, son exploitation est assez économique; à coup sûr elle l'est plus qu'avec l'emploi du système à accumulateurs dont les frais de premier établissement ne sont guère moins élevés, et qui partage à peu près seul son caractère d'innocuité à l'intérieur des villes, sans avoir toutes ses autres qualités.

Pour ces différentes raisons, ce système nous paraît devoir trouver des applications rationnelles dans beaucoup de villes quand l'emploi du système à fil aérien ne sera pas toléré et que le combustible ne sera pas trop cher.

CHAPITRE III

Traction à vapeur : Locomotives à foyer.

§ 77. — La vapeur est la source véritable de force motrice de tous les systèmes que nous venons de passer en revue. Mais ils sont tous caractérisés par l'emploi d'un intermédiaire pour l'utilisation de cette source d'énergie : câble, électricité, air comprimé..., intermédiaires qui ont pour premier et inévitable résultat d'amener une augmentation considérable dans les frais de premier établissement, sans parler de l'affaiblissement du rendement.

Aussi paraît-il beaucoup plus rationnel et plus simple d'employer directement la vapeur à la traction des tramways, comme on l'a fait avec un tel succès pour la traction des trains sur les grandes voies ferrées.

Mais les conditions sont loin d'être les mêmes et les exigences d'un service de tramways ne peuvent, en aucune façon, se comparer aux conditions d'exploitation des grands chemins de fer.

Les premiers essais de traction mécanique des tramways ont été faits avec de petites locomotives à vapeur ; mais l'expérience n'a pas tardé à mettre en lumière les nombreux inconvénients qu'elles présentaient pour cette application spéciale.

Les grandes locomotives employées sur les voies ferrées du monde entier et constamment perfectionnées depuis un demi-siècle, sont arrivées à leur point de perfection et constituent incontestablement le plus merveilleux outil de traction qui ait été encore réalisé. Il paraît bien difficile de faire mieux dans l'état actuel de la science et il est à croire qu'elles conserveront longtemps encore leur supériorité.

Mais il n'en résulte pas que la réduction d'un organisme aussi complexe sous un poids et un volume bien moindres, présente les mêmes avantages. Les petites locomotives sont nécessairement plus délicates que les grandes et ne peuvent présenter le même caractère de force et de solidité, principalement en ce qui concerne la chaudière et ses multiples parties.

Cependant le service que doivent effectuer les petites locomotives de tramways est bien plus dur et plus pénible ; les voies établies soit sur chaussée, soit sur accotement de route, sont toujours dans des conditions d'établissement et d'entretien bien inférieures à celles des grandes lignes posées sur plate-forme spéciale.

Elles présentent, en outre, un profil généralement accidenté avec des rampes et des courbes très dures, et bien souvent sont trop faibles pour les charges et les efforts qu'elles ont à supporter.

Aussi l'entretien, le nettoyage et les réparations de ces petites locomotives constituent-ils trop souvent des charges particulièrement onéreuses, principalement en ce qui concerne la chaudière, dont les avaries causent la majeure partie des mises hors de service.

Pendant le fonctionnement, le foyer, le niveau et la pression de ces chaudières nécessitent une surveillance et des soins constants qui obligent généralement à avoir deux hommes sur la locomotive et augmentent les frais de personnel.

L'utilisation du combustible est beaucoup moins avantageuse dans ces petites chaudières que dans les grands générateurs fixes utilisés par les précédents systèmes et qui peuvent être munis de toutes les dispositions permettant l'économie et l'emploi rationnel du combustible. De même pour ce qui concerne l'utilisation de la vapeur dans les cylindres moteurs, comparée à son utilisation dans les machines fixes à grande détente et à condensation. Aussi la consommation de combustible par cheval indiqué dans les cylindres moteurs est-elle trois ou quatre fois plus considérable que la consommation obtenue dans de bonnes machines fixes, ce qui compense en grande partie l'affaiblissement du rendement produit par les transformations successives de l'énergie.

La chaleur, la fumée, les projections de flammèches et d'escarbilles font que ce mode de traction est peu agréable aux voyageurs et aux riverains des lignes ; l'emploi en a même été interdit par beaucoup de municipalités. Il n'est guère admissible pour la circulation dans les villes et peut tout au plus se tolérer pour les lignes vicinales et de banlieue. Les voitures toujours plus ou moins souillées par la fumée et la poussière de charbon, offrent un aspect peu engageant et se prêtent difficilement à un service prétendant au confortable et au luxe.

Enfin, les conditions d'élasticité de puissance ne sont pas aussi faciles à satisfaire qu'avec la plupart des systèmes précédents : la force motrice n'est produite qu'au fur et à mesure de son emploi

et il n'y a pas de réserve pour un effort momentané (démarrage sur une forte rampe), ni pour un coup de collier un peu prolongé (forte charge à remorquer ou longue et forte rampe à gravir). Le seul moyen d'y remédier est d'augmenter plus qu'il ne serait nécessaire les dimensions, la puissance de vaporisation et, par suite, le poids mort de la locomotive.

§ 78. — Tous ces inconvénients et quelques autres qui en découlent, expliquent suffisamment les motifs qui ont porté à rechercher et à employer les différents systèmes que nous avons énumérés, systèmes moins simples évidemment, mais tous mieux appropriés à un service urbain régulier et satisfaisant.

Ces inconvénients n'empêchent pas, toutefois, les locomotives à vapeur de constituer le mode de traction mécanique le plus employé à l'heure actuelle en Europe pour les tramways et les lignes vicinales. En Angleterre seulement, leur nombre s'élève à plus de 500 et il y en a aussi beaucoup en Belgique, en Suisse, en Italie.

Elles sont aussi très répandues aux Etats-Unis, malgré la vogue qu'y possèdent les tramways électriques et à câble, et ont donné d'excellents résultats dans nombre d'installations où, par suite du faible trafic, ces deux systèmes auraient été d'une application très désavantageuse.

Elles évitent l'installation de coûteuses usines fixes et les seules dépenses de premier établissement, en ce qui concerne la traction, consistent dans l'achat de ces locomotives en nombre suffisant pour le service à effectuer. Aussi l'augmentation et l'extension du trafic sont-elles des plus faciles à obtenir puisqu'il suffit d'augmenter d'une quantité correspondante le nombre des locomotives en circulation.

§ 79. — En général, ces petites locomotives n'ont que deux essieux couplés aussi rapprochés que possible afin de réduire l'empattement au minimum. Les plus fortes toutefois en ont trois afin d'avoir une meilleure stabilité et de réduire la charge par essieu qui ne doit pas dépasser autant que possible 5 à 6 *t* pour des voies de tramways. Parfois, alors, le premier essieu est un simple essieu porteur indépendant ; dans ce cas l'adhérence complète n'est pas utilisée. Le plus souvent les trois essieux sont accouplés et les boudins des roues du milieu sont supprimés.

Le mécanisme est protégé par une enveloppe métallique le

soustrayant le plus possible à l'action de la poussière et de la boue ; quelquefois même il est disposé au-dessus du châssis, ce qui n'est pas très favorable à la stabilité.

Le combustible brûlé est du coke ou un mélange de coke et de briquettes donnant le moins de fumée possible. Le tirage est activé par l'échappement de vapeur et pour atténuer le bruit de cette décharge on donne au tuyau d'échappement une grande section. Une des grandes préoccupations des constructeurs a précisément été d'éviter les inconvénients de cet échappement bruyant pendant la traversée des villes. Pour cela on a cherché à ramener par une détente prolongée la pression d'évacuation de la vapeur à une faible valeur, cette longue détente étant obtenue au moyen de cylindres compound. On a aussi cherché à condenser le plus possible la vapeur d'échappement au moyen de condenseurs tubulaires refroidis par un courant d'air. Quelques-unes de ces dispositions ont donné de bons résultats.

Nous ne décrirons pas les types de locomotives variables à l'infini qui ont été proposés et employés à cet usage tant en Amérique qu'en Europe. Nous insisterons seulement sur l'importance qu'a le choix d'un matériel irréprochable sous le rapport de la qualité des matières, comme sous celui de la bonne construction et disposition des pièces. Trop souvent les économies faites sur ce chef ont été bien chèrement payées en entretien et réparations de toutes sortes.

Nous croyons intéressant de donner quelques renseignements sur deux lignes exploitées par locomotives à vapeur et qui ont donné de bons résultats : le réseau des tramways de Saint-Étienne et celui de Genève.

§ 80. — *Tramways à vapeur de Saint-Étienne.* — Ce réseau comprend trois lignes distinctes : La première desservant la ville de Saint-Étienne, la deuxième allant de Saint-Étienne à Firminy et la troisième allant de Saint-Étienne à Rive-de-Gier, présentant un développement total de 38,600 *km* à voie de 1 *m*. La dernière partie du réseau est particulièrement accidentée et présente des rampes atteignant à certains endroits jusqu'à 60 et 70 *mm* par mètre.

La première partie traverse toute la ville de Saint-Étienne en circulant dans des rues populeuses et souvent très étroites.

Les locomotives employées sont de plusieurs types différents :

1° La locomotive Brown de 11 *t* à vide avec cylindres placés au-dessus du châssis. Il y a deux essieux couplés et la charge

par essieu en service courant atteint 6,5 *t*, ce qui est beaucoup pour la voie. Partie de ces locomotives sont disposées pour condenser la vapeur et font le service de la ville de Saint-Étienne;

2° Locomotives de la Société « la Métallurgique ». Ces locomotives de même poids que les précédentes, mais à six roues couplées, sont plus stables et éprouvent moins la voie que les précédentes;

3° Locomotives Carels, de Gand. — Ce sont les plus puissantes: elles pèsent 12 *t* à vide, 15 *t* en charge et ont six roues couplées, mais les roues du milieu n'ont pas de boudin afin de présenter moins de résistance dans les courbes.

Ces locomotives, très robustes, effectuent d'une manière satisfaisante le service très dur de la ligne de Rive-de-Gier en remorquant aisément trois voitures sur les plus fortes rampes.

Les trains sont de trois ou quatre voitures pesant 2 500 à 3 000 *kg* à vide et 5 à 6 000 *kg* en charge.

La vitesse moyenne de service, y compris les arrêts nombreux, varie de 10 à 12 *km*. La vitesse maxima en dehors des villes atteint 20 *km*. Grâce à la modicité des tarifs (0,10 *f* pour traverser toute la ville de Saint-Étienne), ce service a attiré un nombre considérable de voyageurs qui a souvent dépassé 8 millions par an depuis l'ouverture du réseau.

La consommation moyenne de combustible est d'environ 4 *kg* de coke par kilomètre-train et 1,6 *kg* par kilomètre-voiture.

Le parcours journalier d'une locomotive est de 108 à 110 *km*; il y a 34 locomotives en tout dont 22 en circulation effectuant 2 300 à 2 400 *km* correspondant à plus de 6 000 *km*-voitures.

Les frais de traction par kilomètre-train et par kilomètre-voiture sont les suivants :

Combustible, eau et graissage	0,188 *f* par k.-tr.	0,071 *f* par k.-v.
Personnel de conduite. . . .	0,175 —	0,167 —
Entretien des locomotives et divers.	0,137 —	0,052 —
Totaux. . . .	0,500 *f* par k.-tr.	0,190 *f* par k.-v.

§ 81. — *Réseau des Tramways suisses à Genève.* — La ligne présente un longueur de 11,870 *km* à voie normale présentant des rampes atteignant 43 *mm* par mètre.

La voie système Marsillon composée de rails de 15 à 17 *kg* est trop faible. Elle était prévue pour recevoir des voitures à traction animale pesant 5 *t* en charge et elle donne actuellement passage à des trains circulant à des vitesses de 20 *km* à l'heure avec des locomotives pesant près de 10 *t* en charge. La Compagnie a reculé devant la grande dépense qu'aurait entraînée le remplacement complet de la voie et s'est contentée de la consolider en doublant le nombre des traverses. Aussi la voie est-elle fatiguée et nécessite des dépenses d'entretien considérables.

Les locomotives employées sont du type Brown de la fabrique de Winterthur pesant 8,5 *t* à vide et remorquant deux ou trois voitures de 35 places pesant à vide 2 500 *kg*. Il y a sept locomotives en tout dont cinq en service effectuant 100 à 115 *km* par jour.

Le tarif moyen est de 0,06 *f* par kilomètre ; mais il comporte des réductions pour les billets d'aller et retour et pour certaines catégories de voyageurs

La consommation moyenne de combustible est de 3,5 *kg* par kilomètre-train, soit 1,55 *kg* par kilomètre-voiture. Le combustible employé est un mélange de 2/3 coke et 1/3 agglomérés revenant en moyenne à près de 40 *f* la tonne. Ce combustible est donc très cher.

Par contre la main-d'œuvre est bon marché : 3 à 6 *f* par jour suivant la qualité de l'ouvrier.

Les frais de traction par kilomètre-train et par kilomètre-voiture ont été les suivants en 1893 :

Combustible, eau et graissage	0,191 *f* par k.-tr. et	0,084 *f* par k.-v.
Personnel de conduite . . .	0,120 —	0,054 —
Entretien des locomotives. .	0,046 —	0,020 —
Totaux. . . .	0,357 *f* par k.-tr. et	0,158 *f* par k.-v.

On remarquera la faiblesse du chiffre porté pour les dépenses d'entretien des locomotives ; l'année précédente ces dépenses n'avaient été que de 0,073 *f* par kilomètre-train. Ces chiffres sont d'autant plus remarquables que la voie est mauvaise ; ils sont tout en faveur du matériel employé et du personnel de conduite.

Par contre l'entretien de la voie est très onéreux ; en n'en imputant qu'une moitié seulement à la traction mécanique, le prix

de revient du kilomètre-train est grevé de ce chef d'environ 0,15 *f* et le kilomètre-voiture d'environ 0,0675 *f*.

Le parcours annuel total pendant l'exercice 1893 a été de 180 759 *km*-trains et 407 321 *km*-voitures.

Il est assez intéressant de comparer les résultats ci-dessus avec ceux qu'a donnés la traction animale appliquée au même réseau :

Nourriture et litière des chevaux . .	0,175 *f*	par kil.-voiture
Personnel des écuries et cochers. . .	0,107	—
Entretien des harnais et chevaux. . .	0,048	—
Total	0,330 *f*	par kil.-voiture.

Par suite le kilomètre-voiture par traction animale revient presque aussi cher que le kilomètre-train par traction mécanique. Cette traction est faite par 122 *ch* ayant effectué en 1893 460 277 *km*-voitures, soit en moyenne 3 770 par cheval et par an.

La même Compagnie construit et se propose d'exploiter sous peu une ligne de 5,600 *km* à traction électrique avec fil aérien; la force motrice hydraulique lui est fournie à raison de 0,055 *f* le cheval-heure, et elle espère que le prix de traction ne dépassera pas 0,20 *f* par kilomètre-voiture, amortissement non compris.

§ 82. — On a cherché à concilier l'emploi de la vapeur avec celui de voitures automobiles plus propres à un service urbain que de véritables trains.

Dans cet ordre d'idées, nous devons citer la voiture automotrice Rowan et la voiture Serpollet, toutes deux essayées à Paris, l'une par la Compagnie générale des Omnibus et l'autre par la Compagnie des Tramways Nord.

La voiture Rowan qui n'est, à vrai dire, que la combinaison d'une voiture et d'une locomotive, se compose d'une caisse appuyée d'une part sur un bogie à quatre roues sur lequel est monté tout l'appareil moteur, et de l'autre côté, sur un train de roues guidé par un truck mobile. Une partie seulement du poids de la voiture est utilisée à l'adhérence.

La vapeur est fournie par une ou deux petites chaudières verticales à tirage naturel et elle est condensée au sortir de la machine dans un condenseur à surface logé sur l'impériale.

Le poids des bogies portant le mécanisme et les chaudières varie de 3 500 à 5 500 *kg* suivant le type.

La consommation de combustible serait de 3 à 3,5 *kg* de coke par kilomètre-voiture.

§ 83. — La voiture Serpollet, plus nouvelle que la précédente, est aussi plus intéressante. Son originalité réside surtout dans l'emploi de la chaudière multitubulaire à vaporisation instantanée du système Serpollet bien connu.

La principale qualité de cette chaudière est la grande élasticité qu'elle procure grâce à la facilité qu'on a de faire varier presque instantanément la pression dans de très grandes limites en modifiant seulement la quantité d'eau injectée dans les tubes du faisceau.

La température des derniers tubes étant très élevée, la vapeur s'y surchauffe à 250 ou 300° et même davantage.

Elle arrive très sèche dans les cylindres; mais il est peut-être à craindre que ces températures excessives ne donnent de grandes difficultés pour le graissage et l'entretien. Au sortir des cylindres la vapeur serait encore surchauffée et ne donnerait pas d'échappement visible.

La chaudière est formée de 18 tubes à section en |_|; elle est placée à l'avant et séparée par une cloison du reste de la voiture.

Son alimentation se fait par le bas et la vapeur sort par la dernière ou parfois l'avant-dernière rangée de tubes.

Le foyer est enveloppé de parois réfractaires et son tirage est activé par la vapeur d'échappement.

Le moteur, constitué par une machine horizontale à deux cylindres et à grande vitesse, est enfermé dans une boite en tôle qui le met à l'abri de la poussière et de la boue.

Pour supprimer les mauvaises odeurs d'huile de graissage qui pourraient être décomposées par la vapeur à haute température, cette enveloppe en tôle est reliée au cendrier par un tuyau qui amène une partie de l'air destiné à la combustion en le faisant circuler auparavant autour des cylindres et emporter toutes les vapeurs d'huile qui tendraient à se dégager.

Les gaz de la combustion sortant à haute température débouchent par la cheminée de la chaudière dans l'intérieur d'une deuxième cheminée qui est la continuation de l'enveloppe du générateur et produit un appel d'air actif. Ces gaz sont donc considérablement dilués avant leur évacuation et de plus la circulation d'air autour de la chaudière produit un excellent isolement

de celle-ci et empêche la chaleur de se transmettre au reste de la voiture.

Les moteurs à grande vitesse commandent les essieux par une transmission à chaînes Galle réduisant la vitesse dans le rapport de 3 à 1.

Cette disposition permet de réduire considérablement le poids des moteurs et le poids mort total.

Le chargement de combustible se fait au moyen de petits coffres en tôle remplis de coke poussé dans le foyer; il suffit pour un parcours de 11 *km* pendant lequel le mécanicien n'a plus à s'occuper de son feu : la nécessité du chauffeur est donc évitée. On étudie actuellement la combinaison de la chaudière avec un foyer fumivore permettant l'emploi de la houille sans donner plus de fumée que le coke.

Malgré l'utilisation assez médiocre du combustible, le fonctionnement serait économique grâce à l'emploi de la vapeur surchauffée et la dépense de coke ne dépasserait pas, d'après l'inventeur, 2 *kg* par kilomètre-voiture.

Cette application de la chaudière Serpollet à la traction des tramways, qui surmonte beaucoup des difficultés inhérentes à l'emploi des locomotives à foyer, est évidemment originale et fournit une solution très intéressante à suivre.

L'aléa nous paraît résider principalement dans l'entretien coûteux que nécessiteront les chaudières et le mécanisme, et dans les dangers de grippement des cylindres aux trop hautes températures du fonctionnement. La commande des essieux par chaîne articulée n'est peut-être pas non plus très heureuse.

L'équipement mécanique complet d'une voiture reviendrait à environ 16 000 *f* formant les seules dépenses nécessitées par la traction.

CHAPITRE IV

Locomotives sans foyer.

§ 84. — La plupart des inconvénients des locomotives à vapeur proviennent de la chaudière et de l'embarras que donne la présence d'un foyer en combustion, bien plus que de l'emploi même de la vapeur.

Aussi a-t-on été amené par une pente naturelle à supprimer la chaudière et le foyer tout en conservant les avantages économiques de l'emploi direct de la vapeur sans intermédiaire.

Cette conception a été réalisée d'une manière pratique par les locomotives sans foyer système Francq, imaginées en même temps, quoique sur des bases différentes, en Amérique par le docteur Lamm et en France par M. Francq.

Le but principal, la suppression du foyer de la locomotive, est atteint dans ce système par l'utilisation de la grande capacité calorifique de l'eau. La chaudière est remplacée par un simple réservoir d'eau capable d'emmagasiner une quantité de chaleur suffisante pour obtenir la production de vapeur nécessaire au fonctionnement pendant un laps de temps donné.

Cette quantité de chaleur est puisée à la fin de chaque trajet à des foyers établis à demeure dans une installation fixe.

Le moyen le plus pratique d'obtenir la transmission de chaleur rapide de ces foyers au réservoir d'eau de la locomotive est d'employer le chauffage à la vapeur en faisant barboter dans ce réservoir d'eau qui tient lieu de chaudière un courant de vapeur actif à haute pression.

Cette vapeur est produite par des générateurs fixes installés à la station de départ et utilisant la chaleur des foyers.

§ 85. — L'écoulement de vapeur se faisant en vertu de la différence de pression entre les deux milieux, la pression dans la chaudière fixe doit être au début de la charge, plus élevée que dans le réservoir mobile. Mais, au fur et à mesure du chauffage,

la température de l'eau s'élève et en même temps la tension des vapeurs qu'elle émet, de telle sorte que la différence de pression et de température diminue jusqu'au moment où l'équilibre s'établit entre les deux enceintes.

Il en résulte cette première conclusion : que la pression de la vapeur dans les générateurs fixes doit être plus élevée que la tension maxima dans le réservoir et ceci est également vrai pour les températures. La température de départ pour l'eau du réservoir est donc limitée par les pressions qu'on ne peut, en pratique, dépasser pour des chaudières fixes.

La température finale est, de son côté, limitée par la pression la plus basse qu'on puisse admettre pour le fonctionnement du mécanisme moteur, pression dépendant de l'effort de traction à développer et par suite de la nature du profil aux environs de la station de rechargement.

La quantité de chaleur que l'eau peut emmagasiner entre ces deux limites peut seule être utilisée et nous verrons plus loin qu'elle est amplement suffisante pour permettre d'effectuer de longs parcours.

Pendant le fonctionnement, au fur et à mesure de l'évaporation, la température et la pression baissent dans le réservoir d'eau chaude. Il y a donc intérêt, comme dans le cas de l'air comprimé, à interposer entre ce réservoir et le mécanisme moteur, un régulateur de pression permettant l'écoulement constant de la vapeur à une pression fixe choisie par le mécanicien et qu'il peut lui-même faire varier en cours de route suivant les accidents du profil. C'est ce qui a été réalisé au moyen du régulateur d'admission de vapeur système Francq et Mesnard.

La distribution se fait par coulisse Stephenson, Walshaërt ou autre, permettant de faire varier le degré d'admission.

Grâce à la combinaison de ces deux moyens on peut modifier dans de grandes limites la pression moyenne dans les cylindres suivant l'effort de traction à développer et obtenir presque la même élasticité qu'avec l'emploi de l'air comprimé.

Toutefois il faut remarquer que cette élasticité ne se conserve pas la même jusqu'au bout, car on ne dispose plus de la batterie de réserve que nous avions signalée en décrivant les appareils Mékarsky. Mais en choisissant judicieusement l'emplacement de la station de rechargement par rapport aux rampes maxima que présente le profil, on peut parer à ce petit inconvénient. Cette station doit se trouver autant que possible en un point bas.

§ 86. — L'usine fixe de chargement se réduit à une installation de chaudières à haute pression et d'une tuyauterie convenablement disposée pour permettre le rechargement facile des locomotives.

Ces chaudières peuvent, bien entendu, être munies de tous les perfectionnements et dispositions permettant d'obtenir une bonne utilisation du combustible et un taux de vaporisation élevé.

Elles peuvent aisément donner 7 à 8 *kg* de vapeur sèche par kilogramme de houille brûlée.

Elles sont généralement timbrées à 16 *kg*. Par suite de ces pressions élevées, on ne peut donner de très grandes dimensions transversales aux différents éléments de ces chaudières et on choisit le plus souvent des générateurs multitubulaires genre Babcock et Wilcox, Roser, Belleville, etc... qui se sont beaucoup répandus dans l'industrie depuis une dizaine d'années et auxquels on a soin d'adjoindre un réservoir d'eau et de vapeur de dimensions plus grandes qu'à l'ordinaire.

Toutefois, M. Francq préfère aux chaudières multitubulaires les générateurs à foyer intérieur genre locomotive qui paraissent donner de meilleurs résultats pour cette application.

Ces chaudières doivent débiter de la vapeur d'une manière irrégulière, mais l'irrégularité dépend beaucoup du nombre de moteurs en circulation.

Quand le nombre de moteurs en service est assez grand pour qu'il y en ait constamment à la charge, cet inconvénient disparaît et on peut alors obtenir un écoulement et une production de vapeur tout à fait réguliers ; ceci se produit aussitôt que le nombre de ces moteurs dépasse 9 ou 10.

Quand ils sont, au contraire, trop peu nombreux pour qu'il y en ait constamment en chargement, les chaudières fixes doivent posséder un volume d'eau suffisant pour pouvoir emmagasiner une certaine quantité de chaleur entre deux charges sans trop monter en pression. On a aussi la ressource d'alimenter après chaque charge, ce qui fait tomber la température et la pression et donne une marge de quelques degrés pour remonter en pression jusqu'à ce qu'une autre locomotive se présente au chargement.

Toutefois, si ces moyens très simples n'étaient pas jugés suffisants, il serait très facile d'en imaginer d'autres qui rempliraient complètement le but et à peu de frais.

§ 87. — Quant à la durée d'une charge, on peut la faire varier dans de grandes limites en modifiant la section d'écoulement du robinet de vapeur : depuis 6 jusqu'à 15 ou 20 minutes.

Pour effectuer cette charge, on amène la locomotive sur une fosse de chargement et on réunit par un raccord fileté la tuyauderie de charge avec un robinet d'alimentation disposé sur le récipient de la locomotive et relié par un branchement à un long conduit horizontal disposé au fond de la masse d'eau de ce récipient et percé d'un grand nombre de petits orifices suivant une de ses génératrices.

La vapeur introduite, venant des générateurs fixes, s'échappe par tous ces orifices et traverse la masse d'eau en produisant un brassage énergique qui assure la transmission rapide de la chaleur.

Le tuyau de prise de vapeur des chaudières est relié au tuyau de chargement du récipient mobile par un robinet spécial avec régulateur d'écoulement qui a pour mission de régler automatiquement l'écoulement de la vapeur en augmentant progressivement la section de passage du fluide à mesure que la différence de pression et de température entre les deux enceintes va en diminuant, de façon à produire graduellement et sans entraînement d'eau liquide, le chauffage du réservoir mobile jusqu'à sa température définitive.

Une fois ce résultat atteint, la communication est coupée, le raccord enlevé et la locomotive est prête à rentrer en circulation.

§ 88. — Une locomotive sans foyer se compose essentiellement d'un vaste récipient cylindrique formant réservoir d'eau chaude et d'un mécanisme complètement analogue à celui des locomotives ordinaires.

Le récipient est préservé très soigneusement du refroidissement par rayonnement externe grâce à une enveloppe extérieure en tôle, sur laquelle est appliquée directement une épaisseur de calorifuge spécial de 35 *mm* et laissant entre la tôle du réservoir et elle-même une couche d'air emprisonnée de 35 *mm* d'épaisseur.

Grâce à cette disposition, la déperdition de chaleur pendant un trajet complet est tout à fait insignifiante, même par des temps très froids, et ne dépasse pas 1 calorie par heure, degré d'écart et mètre carré de surface extérieure, soit 1 à 2 0/0 de la quantité de chaleur dépensée. Une locomotive chargée, au repos, ne perd guère plus de 1 *kg* de pression en quatre heures de stationnement.

Le récipient est surmonté d'un dôme de vapeur dans lequel se fait la prise du fluide au moyen d'un tube vertical la puisant, par une série d'ouvertures longitudinales, aussi loin que possible du plan d'eau. Ce tube se raccorde à un appareil extérieur constituant à la fois le régulateur d'admission et le détendeur de vapeur, appareil ayant pour mission de régler à la volonté du mécanicien la pression d'admission de vapeur aux cylindres.

Avant d'arriver à ceux-ci, la vapeur traverse une chambre de vapeur détendue, constituée par un faisceau tubulaire plongé dans la masse d'eau chaude du réservoir et qui sert, en même temps, de réchauffeur-sécheur. Grâce à cette disposition, la vapeur entre dans les cylindres absolument sèche et même légèrement surchauffée pendant une grande partie du parcours, ce qui est une condition favorable de son fonctionnement. On a souvent constaté que dans les premières parties du trajet, on n'avait pas à purger les cylindres, ce qui est une preuve évidente de la surchauffe.

En sortant des cylindres, la vapeur est envoyée dans un condenseur à air formé d'un faisceau tubulaire vertical disposé au-dessus du récipient; la vapeur, avant de s'échapper définitivement au dehors, se répand autour de ce faisceau à l'intérieur duquel cet échappement même produit une circulation d'air active. On arrive ainsi à condenser jusqu'à 30 0/0 de la vapeur d'échappement; le reste est rejeté au dehors sous forme de panache plus ou moins épais.

La locomotive est munie de tous les appareils nécessaires à une locomotive ordinaire : changements de marche, freins, etc.; mais tous les mouvements et leviers de commande sont doublement établis sur la machine pour qu'elle puisse aller aussi bien dans un sens que dans l'autre, sans avoir besoin d'être retournée sur une plaque tournante. Chaque extrémité présente, à cet effet, une plate-forme identique pour le machiniste qui a de chaque côté, sous les yeux et sous la main, tous les appareils nécessaires à la conduite de sa machine.

Le poids d'eau contenu dans le récipient atteint, en général, 30 0/0 du poids de la locomotive à vide.

Il est de 2 000 *kg* pour les machines pesant 7 *t* à vide
et de 3 600 *kg* pour les machines pesant 12 *t* à vide.

Quant au volume de vapeur, il est d'environ 20 0/0 du volume total du réservoir.

Théorie des machines à eau chaude.

§ 89. — Deux points sont très importants à mettre en lumière :

1° La quantité de vapeur que peut donner chaque kilogramme d'eau du réservoir;

2° L'utilisation moyenne de cette vapeur, c'est-à-dire le nombre moyen de kilogrammètres qu'on peut espérer obtenir de chaque kilogramme de vapeur produite.

Ces évaluations sont très faciles à faire avec une précision suffisante pour les besoins de la pratique.

Vapeur produite par kilogramme d'eau

§ 90. — En négligeant la déperdition très faible à travers les parois, on peut dire que toute la quantité de chaleur perdue par l'eau est consacrée à la production de la vapeur.

Désignons par :

P et t le poids d'eau contenu dans le récipient et sa température en degrés centigrades à un moment donné;

r_t la chaleur latente de vaporisation à $t°$;

dP la quantité d'eau vaporisée pendant un temps infiniment petit correspondant à un abaissement dt de la température;

Nous aurons : $$-\mathrm{P}dt = -r_t d\mathrm{P}.$$

Ou $$\frac{d\mathrm{P}}{\mathrm{P}} = \frac{dt}{r_t}.$$

Or : $$r_t = 606{,}5 - 0{,}695\, t. \qquad \text{(Regnault.}$$

On en déduit, en intégrant entre les limites t_1 et t_0, P_1 et P_0 :

$$\text{Log}\,\frac{\mathrm{P}_1}{\mathrm{P}_0} = \frac{1}{0{,}695} \times \text{Log}\,\frac{\dfrac{606{,}5}{0{,}695} - t_0}{\dfrac{606{,}5}{0{,}695} - t_1} = 1{,}44\,\text{Log}\,\frac{871 - t_0}{871 - t_1}.$$

D'où $$\frac{\mathrm{P}_1 - \mathrm{P}_0}{\mathrm{P}_1} = 1 - \left(\frac{871 - t_1}{871 - t_0}\right)^{1{,}44}.$$

Soit $t_0 = 134°$, correspondant à la pression de 3 *atm*, et donnons successivement à t_1 les valeurs correspondant aux pressions depuis 3 jusqu'à 15 *atm*, nous aurons les résultats consignés dans le tableau ci-après :

Pressions de vapeur.	Températures dans le réservoir.	Valeur de $\frac{P_1 - P_0}{P_1}$.
15 *atm*. . .	198°,8. . .	»
14 . . .	195°,5. . .	0,0068 *kg*
13 . . .	192°,1. . .	0,0142
12 . . .	188°,4. . .	0,0227
11 . . .	184°,5. . .	0,0299
10 . . .	180°,3. . .	0,0384
9 . . .	175°,8. . .	0,0470
8 . . .	170°,8. . .	0,0570
7 . . .	165°,3. . .	0,0676
6 . . .	159°,2. .	0,0792
5 . . .	152°,2. . .	0,0919
4 . . .	144°. . . .	0,1066
3 . . .	134°. . . .	0,1242
2 . . .	120°,2. . .	0,1480

En examinant ce tableau, on se rend de suite compte qu'aux hautes températures, l'eau fournit beaucoup moins de vapeur en baissant d'une atmosphère qu'aux températures relativement basses. Ceci est dû à l'accroissement rapide de ses tensions de vapeur en fonction de la température qui fait qu'entre 14 et 15 *atm* il y a un écart quatre fois plus faible qu'entre 2 et 3 *atm*.

On a donc intérêt à ne pas dépasser 199° correspondant à 15 *atm*, parce que, pour gagner quelques degrés en plus, on serait obligé d'avoir des pressions beaucoup plus élevées, ce qui non seulement augmenterait le poids mort et le prix des installations fixes et roulantes, mais encore augmenterait beaucoup les difficultés du fonctionnement.

Par contre, on aurait tout intérêt à descendre aux plus basses pressions possibles, parce qu'alors les différences de température et les quantités de chaleur emmagasinées sont beaucoup plus considérables pour une même variation de pression. Mais, au-dessous de 3 *atm*, l'utilisation de la vapeur dans les cylindres deviendrait si mauvaise qu'on est aussi arrêté de ce côté, sans

parler de la difficulté d'obtenir un effort de traction suffisant avec d'aussi basses pressions.

En pratique, on ne doit pas rentrer au dépôt avec une pression inférieure à 3,5 *kg* ou 3 *kg* au minimum et l'on ne compte pas sur une production de vapeur supérieure à 0,120 *kg* ou 0,130 *kg* par kilogramme d'eau emmagasinée.

§ 91. — S'il n'y avait aucune cause de perte, la quantité de vapeur nécessaire au réchauffage à l'usine centrale serait exactement $P_1 - P_0$, car l'équation différentielle du réchauffage serait encore :

$$P dt = r_t dP,$$

et son intégration entre les mêmes limites donnerait la même valeur de $P_1 - P_0$.

Mais, en réalité, une partie de la chaleur contenue dans l'eau du récipient se perd par rayonnement et doit être récupérée à l'usine fixe par la circulation d'une petite proportion supplémentaire de vapeur.

D'autre part, on est obligé de purger de temps en temps ce récipient, sans quoi il se remplirait bientôt, par suite de l'excédent de la quantité de vapeur à y envoyer sur celle qu'il émet. Ces purges peuvent même avoir une importance considérable quand la vapeur de réchauffage entraîne une forte proportion d'eau, ce qui arrive toutes les fois que les chaudières n'ont pas un plan d'eau suffisant ou ne sont pas proportionnées au récipient à charger.

Ces purges sont la cause de pertes nouvelles de calorique.

Aussi est-il bon de compter que les chaudières fixes doivent produire pour le chargement 8 à 10 0/0 de vapeur en plus que la quantité utilisée par les cylindres moteurs des locomotives.

§ 92. — Pendant la plus grande partie du parcours, la vapeur est laminée par le détendeur, de manière à n'avoir qu'une pression de 3 à 4 *kg* à l'admission dans les cylindres. Ce laminage n'est pas, toutefois, une cause de perte aussi grande qu'on serait porté à le croire, car le mécanisme d'une locomotive ne se prête pas aisément aux longues détentes qui seraient nécessaires pour profiter de l'avantage des pressions d'admission élevées.

Cette chute de pression a pour effet de surchauffer légèrement

la vapeur, même au cas où elle contiendrait des gouttelettes d'eau entraînées avant son passage dans le détendeur.

En effet, si nous désignons par :

t_1 et r_1 les températures et chaleur latente de vaporisation correspondant à la pression p_1 dans le réservoir;

t_0 et r_0 les quantités analogues correspondant à la pression p_0 dans la chambre de vapeur détendue;

x_1 et x_0 les proportions d'eau liquide contenues par la vapeur dans les deux enceintes,

Nous aurons la relation :

$$r_1(1 - x_1) = r_0(1 - x_0) - (t_1 - t_0),$$

exprimant l'écoulement adiabatique par le détendeur.

Et si nous supposons $x_0 = 0$, c'est-à-dire la vapeur exactement saturée à son entrée dans la chambre de vapeur détendue et si nous remplaçons t_1 et r_0 par leurs valeurs en fonction de t_1 et t_0, ou aura pour déterminer x_1 l'égalité :

$$x_1 = 0,305 \times \frac{t_1 - t_0}{606,5 - 0,695\, t_1}.$$

Pour $t_1 = 199°$ et $t_0 = 134°$, on a $x_1 = 4,3$ 0/0.

Par suite, en admettant que la vapeur puisée contienne 4 0/0 d'eau liquide, elle arrivera entièrement sèche aux cylindres et le laminage aura eu pour effet d'augmenter de 4 0/0 la quantité de vapeur destinée à travailler dans les cylindres.

Le passage dans le réchauffeur servant de chambre de vapeur détendue achève d'assurer sa siccité au moment de son admission.

Si, au contraire, la vapeur était déjà tout à fait sèche en sortant du récipient, elle arriverait sensiblement surchauffée dans les cylindres et, par suite avec un poids spécifique moindre à pression et volumes égaux.

Dans les deux cas, il y a légère augmentation du travail développé par kilogramme vaporisé dans le récipient.

Travail indiqué par kilogramme de vapeur dépensé.

§ 93. — Pour simplifier les calculs, nous supposerons la vapeur arrivant dans les cylindres à la température de saturation et se détendant suivant une hyperbole analogue à la courbe de détente isothermique des gaz parfaits.

Le travail indiqué est alors donné par l'expression :

$$T = p_1 V_1 + p_1 (V_1 + u_1) \operatorname{Log} \frac{V_2 + u_1}{V_1 + u_1} - p_0 v_0 - p_0 u_0 \operatorname{Log} \frac{u_0}{u_1}$$

et le poids de vapeur dépensé, par :

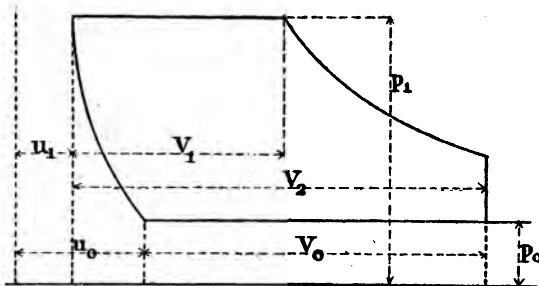
$$M = \pi_1 (V_1 + u_1) - \pi_0 u_0,$$

π_1 et π_0 étant les poids spécifiques aux pressions de saturation p_1 et p_0.

Nous avons fait les calculs dans les deux hypothèses de distributions suivantes :

1re distribution $\begin{cases} V_1 = 40\ 0/0 & u_1 = 7\ 0/0. \\ V_2 = 85\ 0/0 & u_0 = 22\ 0/0. \\ V_0 = 70\ 0/0. \end{cases}$

2e distribution $\begin{cases} V_1 = 30\ 0/0 & u_1 = 7\ 0/0. \\ V_2 = 75\ 0/0 & u_0 = 25\ 0/0. \\ V_0 = 57\ 0/0. \end{cases}$



Et nous avons trouvé les résultats consignés dans le tableau ci-après :

(On a supposé $p_0 = 12\,000$ *kg.*)

PRESSIONS D'ADMISSION	POIDS SPÉCIFIQUE	ADMISSION A 30 0/0		ADMISSION A 40 0/0	
		T	$\frac{T}{M}$	T	$\frac{T}{M}$
kg	kgm	kgm	kgm	kgm	kgm
30 000	1,65	7 200	16 500	10 000	16 100
40 000	2,16	13 120	21 000	17 200	20 000
50 000	2,67	19 060	23 500	24 300	22 000
60 000	3,16	25 000	25 100	31 500	23 600

Ce tableau montre que l'utilisation théorique est d'autant meilleure que la pression d'admission est plus élevée, mais que l'amélioration devient peu sensible au-dessus de 5 ou 6 *atm* : la pression de 4 *atm* sera une bonne pression de marche qu'il faudra conserver le plus longtemps possible. A 3 *atm* l'utilisation est déjà médiocre.

Il montre aussi qu'on peut aisément quadrupler l'effort de traction, tout en conservant une utilisation moyenne convenable et sans monter au delà de 5 à 6 *atm*.

En réalité, les résultats consignés dans le tableau ci-dessus ne sont pas obtenus ; le véritable diagramme est toujours plus faible par suite des pertes de charge, comme nous l'avons vu dans le cas de l'air comprimé et ne dépasse guère les $\frac{9}{10}$ du diagramme théorique.

D'autre part, la dépense de vapeur sera sensiblement plus grande que celle qui résulterait des chiffres ci-dessus, par suite des condensations intérieures dont nous n'avons pas tenu compte. Ces condensations sont un peu atténuées par l'état de surchauffe de la vapeur pendant une partie du trajet. Toutefois, elles peuvent acquérir une grande importance par suite des nombreux arrêts du moteur, nécessitant, à chaque fois, un réchauffage des cylindres. On pourrait les diminuer en entourant les cylindres d'une enveloppe calorifuge ou surtout en les munissant d'une enveloppe de vapeur alimentée par la vapeur à haute pression du récipient ; mais nous ne croyons pas qu'on ait eu recours à ces dispositions en pratique.

§ 94. — Pour ces différents motifs il ne faut pas compter recueillir pour chaque kilogramme de vapeur dépensé, plus de 65 à 70 0/0 des

chiffres portés dans le tableau ci-dessus, c'est-à-dire, en moyenne, plus de :

12 000 *kgm* par kilogramme de vapeur dépensée, ni plus de :

1 500 à 1 600 *kgm* par kilogramme d'eau emmagasinée.

Ces chiffres correspondent à très peu près aux résultats de la pratique.

On voit que la dépense de vapeur des chaudières fixes ressort à 23 ou 25 *kg* par cheval-vapeur-heure dépensé, ce qui correspond à environ 3 ou 3,5 *kg* de combustible.

Une locomotive pesant 15 tonnes en charge, remorquant 3 voitures chargées de 7 000 *kg* chacune, en développant un effort de traction moyen de 480 *kg*, dépensera à peu près 44 *kg* de vapeur, soit 5,5 *kg* à 6 *kg* de houille par kilomètre-train.

Les petites locomotives à foyer ne dépenseraient guère moins dans les mêmes conditions.

Poids mort et distance franchissable.

§ 95. — Le poids mort du récipient d'eau, avec son dôme de vapeur, son enveloppe et ses accessoires, est d'environ 0,6 *kg* par kilogramme d'eau contenue.

Le poids de ce récipient avec sa charge d'eau est donc au total de 1,6 *kg* par kilogramme d'eau, soit environ 1 *kg* par 1 000 *kgm* emmagasinés.

Si nous nous reportons aux résultats que nous avons trouvés pour l'air comprimé dans les conditions de pression et de résistance du métal admises pour les plus récentes installations, nous voyons qu'ils sont à peu près identiques.

Si nous faisons la comparaison pour les volumes, nous trouvons également des résultats presque identiques, car 1 m^3 de réservoir peut débiter 90 *kg* d'air à 80 *atm* et emmagasiner environ 1 400 000 *kgm* alors que 1 m^3 de récipient peut contenir 800 *kg* d'eau chaude et emmagasiner à très peu près la même puissance.

Les distances franchissables seront donc à peu près les mêmes à poids mort et encombrement égaux, en admettant bien entendu l'emploi de l'air à la pression de 80 *atm*.

Nous avons dit que le poids d'eau contenu était d'environ 230 à 250 *kg* par tonne de locomotive en charge.

Par suite la puissance qu'il est possible d'emmagasiner dans une locomotive à eau chaude peut atteindre 400 000 *kgm* par tonne de poids en charge et permet à cette locomotive d'effectuer en palier un parcours de 25 à 30 *km* sans qu'elle ait besoin d'être rechargée.

En abaissant la pression finale au-dessous de 3 *atm* on pourrait encore agrandir ce rayon d'action; mais en pratique on ne cherche guère à dépasser 14 ou 15 *km* de parcours. Si la ligne comportait des trajets plus longs, il serait préférable de disposer une deuxième usine de chargement.

§ 96. — Le poids des locomotives à eau chaude se détermine d'après deux considérations d'ordre différent :

1° D'après l'effort de traction maximum qu'elles doivent fournir.

2° D'après le travail qu'elles doivent emmagasiner pour effectuer un service donné entre deux opérations de chargement.

Si nous désignons par :

μ le rapport du poids de la locomotive en charge au poids du train à remorquer;

r la rampe maxima en millimètres par mètre ;

L la longueur du trajet entre deux charges;

Et si nous supposons la résistance en palier égale à 10 *kg* en moyenne par tonne de convoi;

Le coefficient d'adhérence égal à 0,13, soit 130 *kg* par tonne de locomotive ;

Le travail total à dépenser égal à 13 000 *kgm*, en moyenne, par tonne de convoi et kilomètre de parcours ;

Le travail total emmagasinable par tonne de locomotive égal à 400 000 *kgm* ;

La valeur de μ devra satisfaire aux deux inégalités suivantes :

$$(1) \qquad 130\,\mu \geqslant (10 + \mu)(1 + \mu) \text{ ou } r \leqslant \frac{120\,\mu - 10}{1 + \mu};$$

$$(2) \qquad 400\,000\,\mu \geqslant 13\,000\,\mathrm{L}\,(1 + \mu) \text{ ou } \mathrm{L} \leqslant \frac{400\,\mu}{13\,(1 + \mu)}.$$

En donnant à μ diverses valeurs comprises entre 0 et 1, nous trouvons pour r et L les valeurs maxima consignées dans le tableau ci-joint :

VALEURS DU RAPPORT μ	RAMPE MAXIMA	TRAJET MAXIMUM	POIDS APPROXIMATIF PAR PLACE OFFERTE	
			de locomotive	Poids mort total
	mm	m	kg	kg
0,30	20	6 000	40	110
0,50	33	10 000	70	140
0,75	45	13 500	105	175
1,00	55	15 500	140	210

On voit que les fortes rampes et les augmentations du trajet à parcourir entre deux charges entraînent à d'importantes et coûteuses augmentations du poids de la locomotive et du poids mort total.

Prenons pour fixer les idées un exemple numérique :

1° Une locomotive pesant 7 500 *kg* à vide, 10 000 *kg* en charge, coûtant environ 20 000 *f*, remorquera un train de 21 *t* représentant l'équivalent de 3 voitures de 50 places, complètement chargées, sur des rampes de 30 *mm* et pourra effectuer un parcours de 10 000 *m* d'une seule traite.

Avec un train de 14 *t*, la même locomotive pourra aborder des rampes de 40 *mm* et effectuer un trajet de 12 000 *m* ;

2° Une locomotive pesant 12 000 à 12 500 *kg* à vide et 16 000 *kg* en charge, coûtant environ 30 000 *f*, remorquera le train de 21 *t* sur des rampes de 40 à 45 *mm*, en effectuant un trajet d'au moins 13 000 *m*.

Avec un train de 14 *t* seulement, elle pourra aborder des rampes de 60 *mm* par mètre et franchir une distance de près de 16 *km*.

Mais la dépense de force motrice par kilomètre-voiture sera bien différente dans ces divers cas et variera de 130 000 à 200 000 *kgm*, par le seul fait de l'augmentation du poids mort, même en admettant des résistances de traction égales en moyenne dans tous les cas.

Ces résultats montrent très nettement l'influence de la nature du

profil, influence beaucoup plus grande quand la traction se fait par locomotives que quand elle se fait par automobiles.

On a grand avantage à réduire le poids de la locomotive autant que le permet la nature de la ligne.

FRAIS DE PREMIER ÉTABLISSEMENT

Matériel roulant.

§ 97. — Avec le système à eau chaude, comme avec le système à air comprimé, il y a une perte de temps forcée pour le chargement des locomotives, perte de temps qui oblige à avoir au total (y compris les réserves) un nombre de locomotives égal à une fois et demie celui qui est en circulation.

Afin d'avoir une base pour les calculs, nous supposerons l'emploi de locomotives pesant environ 16 *t* en charge et nous admettrons qu'il y a en moyenne 2 voitures en circulation par locomotive. Ce cas est évidemment un cas extrême et il va sans dire que tous les chiffres qui vont résulter de cette hypothèse pourraient être sensiblement réduits avec l'emploi de locomotives d'une moindre puissance.

Nous rapportons, comme nous l'avons déjà fait, les frais de premier établissement :

1° Au nombre de locomotives en circulation;

2° Au nombre de voitures (supposées de 50 places);

3° Au nombre de kilomètres-voitures à effectuer par heure.

Les locomotives du type supposé, coûtant environ 30 000 *f*, la dépense de premier établissement ressortira de ce chef à :

45 000 *f* par locomotive en circulation ;
22 500 *f* par voiture en circulation ;
2 250 *f* par kilomètre-voiture à effectuer par heure.

Usine fixe.

§ 98. — La dépense correspondante est relativement peu importante, car cette usine se réduit à l'installation d'une batterie de chaudières de force suffisante, avec la tuyauterie et les installations nécessaires pour la charge.

Les chaudières doivent être prévues à raison de :

4 m^2 par voiture de 50 places en circulation;
8 m^2 par locomotive de 10 *t* en circulation ;
12 m^2 par locomotive de 16 *t* en circulation.
Mais il faut compter un tiers en plus pour la réserve.

Cet ensemble, y compris les bâtiments, ne reviendra pas à plus de 10 000 *f* par train en circulation, composé en moyenne d'une locomotive de 16 *t* et de 2 voitures de 50 places, soit 20 à 25 0/0 du prix du matériel roulant de traction.

Le total des frais de premier établissement pour la traction peut donc s'évaluer à :

55 000 *f* par locomotive de 16 *t* en circulation ;
2 700 à 28 000 *f* par voiture de 50 places en circulation ;
2 700 à 2 800 *f* par kilomètre-voiture à effectuer par heure.

Ces prix se réduiraient d'environ 25 0/0 avec l'emploi de locomotives de 10 *t* à la place de celles de 16 *t*.

Si nous comparons ces chiffres avec ceux que nous avons trouvés pour les autres systèmes, on voit que l'emploi direct de la vapeur entraîne une économie des plus importantes dans les frais de premier établissement relatifs à la traction ; c'est là son principal avantage.

Conditions et frais d'exploitation de quelques tramways à eau chaude.

§ 99. — Les locomotives sans foyer ont été employées d'une manière industrielle pour la première fois en Europe, en 1878, sur la ligne de Rueil à Marly-le-Roi, longue de 9,25 *km*, sensiblement de niveau sur la plus grande partie de son tracé, mais présentant, entre Port-Marly et Marly-le-Roi, des rampes de 50 à 60 *mm* par mètre.

Le service se faisait au moyen de petites locomotives pesant 6 600 *kg* à vide et 8 500 *kg* en charge, au nombre de trois en circulation à la fois. Il s'est continué très régulièrement et d'une manière satisfaisante jusqu'à l'absorption de la ligne par la Compagnie des Tramways de Paris à Saint-Germain ; l'économie était sensible sur les locomotives à foyer employées concurremment dans les débuts et le fonctionnement meilleur sous tous les rapports.

Les frais de la traction par kilomètre-train de deux ou trois voitures ont été les suivants pendant l'exercice 1880 :

Combustible et graissage . .	0,165 *f*	(charbon à 30 *f* la tonne).
Personnel et traction. . . .	0,120	
Entretien et réparations . .	0,090	
TOTAL. . . .	0,375 *f*	par kilomètre-train.

Amortissement non compris.

La consommation moyenne de houille a varié de 4,00 à 4,50 *kg* par kilomètre-train.

Après l'absorption de la ligne par la Compagnie des Tramways de Paris à Saint-Germain, le service fut fait pendant un certain temps par des locomotives beaucoup plus puissantes pesant 15 600 *kg* en charge et remorquant des trains de 30 *t*. Puis ces locomotives furent elles-mêmes remplacées par des locomotives à foyer, probablement par suite de la trop grande longueur du trajet.

Les locomotives sans foyer avaient fonctionné très régulièrement et il paraîtrait que la substitution des locomotives à foyer a amené une sensible augmentation dans les frais d'exploitation.

Les dépenses de traction par les locomotives sans foyer avaient été les suivantes en 1891, par kilomètre-train :

Personnel de conduite	0,081 *f*
Combustible et graissage. . . .	0,255
Personnel des usines fixes . . .	0,040
Entretien du matériel	0,069
TOTAL des frais de traction.	0,445 *f* par kilomètre-train

de trois ou quatre voitures.

§ 100. — Les résultats satisfaisants donnés par les lignes de Rueil-Marly ont déterminé l'extension du système sans foyer à un assez grand nombre d'installations en France et à l'étranger, parmi lesquelles nous citerons notamment :

Les lignes de Lille à Roubaix et de Lille à Tourcoing;

Les lignes de Lyon à Saint-Fons, de Lyon à Bron et de Lyon à Montplaisir ;

La ligne de Batavia à Kramat et Meester Cornelis (Java);

La Ligne de l'Étoile à Courbevoie;

La ligne de l'Est-Marseille.

Nous donnons ci après quelques renseignements que nous avons pu réunir sur ces différentes lignes, toutes placées dans des conditions très diverses et qui ont donné des résultats satisfaisants.

1° *Lignes de Lille à Roubaix et Tourcoing.*

§ 101. — Ces lignes présentant ensemble un développement de près de 25 *km* appartiennent à la Compagnie des Tramways du département du Nord.

La traction mécanique ayant été décidée en principe par suite de la longueur des trajets, la Compagnie essaya d'abord l'emploi de machines à feu système Hughes qui n'eurent pas de succès, puis des locomotives Carels qui firent un meilleur service.

En 1884 les locomotives sans foyer système Francq furent employées concurremment avec ces dernières et donnèrent de si bous résultats que peu d'années après les locomotives Carels furent transformées en locomotives sans foyer et le service ne se fit plns dès lors que d'après ce dernier système.

Entre Lille et Roubaix, la voie est pour la plus grande partie (8 200 *m* sur 11 100 *m*) établie en chaussée; cette voie est en assez mauvais état et donne une résistance au roulement considérable. La rampe maxima est de 53 *mm* par mètre et la courbe la plus faible a 18 *m* de rayon.

On a commis la faute d'installer deux dépôts, l'un au Lyon-d'Or, près de Lille, l'autre au Brœucq près de Roubaix, au lieu d'un seul à cheval sur la ligne, qui aurait donné lieu à de moindres frais d'exploitation.

Le dépôt du Lyon-d'Or contient quatre chaudières multitubulaires d'une surface de chauffe totale de 140 m^2, dont trois constamment en service pour le chargement des locomotives, l'atelier, le service de l'eau, etc.

Ces chaudières à réservoir de vapeur insuffisant donnent lieu à des entraînements d'eau liquide très préjudiciables à l'économie du système.

Aussi la dépense de combustible atteint-elle jusqu'à 6 et 7 *kg* par kilomètre-train ; il faut dire que ce combustible formé de menu de houille est très médiocre et que le chiffre ci-dessus comprend la dépense pour les autres services.

Au dépôt de Brœucq, au contraire, où sont installées deux chaudières à foyer intérieur de 50 m^2, la dépense oscille entre 4 *kg* et 4,50 *kg* par kilomètre-train.

Les machines pesant 8 500 et 10 000 *kg* à vide, ne présentent aucune particularité remarquable ; celles de ce dernier type font jusqu'à 18 *km* avec deux voitures chargées.

Sur la ligne de Lille à Tourcoing, longue de près de 13 *km*, la voie est dans des conditions un peu meilleures et les rampes sont moins fortes. L'alimentation se fait au moyen d'un seul dépôt à Marcq, placé à mi-chemin ; les chaudières sont du type multitubulaire, mais avec un réservoir d'eau plus grand que celui du Lyon-d'Or.

Le service est plus spécialement fait par des locomotives Carels transformées.

Les frais de traction sur ces lignes ont varié de 0,30 *f* à 0,37 *f* le kilomètre-train (non compris l'amortissement, ni les redevances à la Compagnie des locomotives sans foyer).

Pour le mois d'août 1892, les dépenses ont été les suivantes :

	Lille à Roubaix — Le kilomètre-train	Lille à Tourcoing — Le kilomètre-train
Combustible, graissage et essuyage.	0,125 *f*	0,112 *f*
Personnel de conduite	0,095	0,087
Entretien du matériel fixe et roulant.	0,114	0,070
Éclairage et divers.	0,006	0,006
Totaux. . . .	0,340 *f*	0,275 *f*

Pendant l'ensemble de l'année 1892, les frais de traction se sont élevés :

1° Sur la ligne de Roubaix à 0,355 *f* par kilomètre-train et 0,220 *f* par kilomètre-voiture ;

2° Sur la ligne de Tourcoing à 0,315 *f* par kilomètre-train et 0,230 *f* par kilomètre-voiture.

Le charbon est très bon marché, mais la main-d'œuvre est assez chère. La consommation moyenne de combustible a été :

Sur la ligne de Roubaix, de 6,25 *kg* par kilomètre-train et de 4 *kg* par kilomètre-voiture.

Sur la ligne de Tourcoing de 6,50 *kg* par kilomètre-train et de 5,25 *kg* par kilomètre-voiture.

Ligne de Lyon à Saint-Fons et à Venissieux.

§ 102. — Cette ligne, à voie normale, est alimentée par un dépôt placé à Saint-Fons, au moyen de trois chaudières Babcock et Wilcox à grand volume d'eau. La rampe la plus forte est de 47 *mm* par mètre sur le pont de la Guillotière : mais les machines ont été calculées pour pouvoir ultérieurement effectuer leur service sur la ligne d'Oullins, qui présente des déclivités de 62 *mm* par mètre. Aussi sont-elles un peu trop volumineuses et trop lourdes.

En effet, leur poids en charge atteint 16 *t*, ce qui leur permet de développer un effort de traction de 2 000 *kg*, et de remorquer aisément 3 et même 4 voitures de 50 places.

Les installations ont été prévues d'une manière beaucoup trop large pour le service actuel, qui est peu actif; il ne dépasse guère 300 kilomètres-trains par jour, alors que l'installation permettrait d'en faire 1 000 ou 1 200. Les départs n'ont lieu que d'heure en heure. Ces conditions défavorables influent sur les frais de traction ; on espère les réduire notablement dès que les circonstances permettront de doubler le trafic.

Actuellement, elles atteignent 0,52 *f* par kilomètre-train, amortissement non compris :

Combustible	0,215 *f*
Graissage et divers.	0,055
Personnel de traction	0,167
Entretien.	0,083
	0,520 *f*

Le combustible coûte 25 *f* la tonne et la consommation moyenne a été d'environ 7 *kg* par kilomètre-train.

Les machines se comportent très bien et donnent peu d'entretien : après un parcours de 18 *km*, elles ont encore 2 1/2 *atm* de pression en rentrant au dépôt.

Ligne de Batavia à Kramat et Meester Cornelis.

§ 103. — Cette ligne, d'une longueur de 12 600 *m*, est alimentée par deux dépôts, l'un à Batavia, l'autre à Kramat, contenant chacun quatre chaudières tubulaires, genre locomotive, d'une surface de chauffe de 67 m^2 chacune.

Ces chaudières timbrées à 16 *atm* fonctionnent bien quoique alimentées avec des eaux assez calcaires.

Le service, très actif, se fait au moyen de 27 locomotives sans foyer, pesant 9 *t* en charge et remorquant 2 ou 3 voitures. Le poids moyen des trains est de 25 *t* et il y a près de 2 000 kilomètres-trains par jour ; la consommation de combustible varie de 4 *kg* à 5 *kg* par kilomètre-train. Ce combustible vient d'Angleterre ou d'Australie et coûte souvent très cher. Mais la main-d'œuvre est très bon marché. Aussi le prix de revient de la traction est-il remarquablement bas.

Le nombre annuel de kilomètres-trains s'est élevé de :

617 291 en 1888 à 680 222 en 1892.

Et le nombre annuel de kilomètres-voitures, de :

1 371 359 en 1888 à 1 913 059 en 1892.

Ci-après nous donnons les frais de traction, pendant l'exercice 1891-92 d'après les rapports officiels de la Société :

Frais de personnel.	0,063 *f*
Combustibles et graissage	0,205
Entretien du matériel fixe et roulant. . .	0,043
Eclairage et divers	0,005
TOTAUX par kilomètre-train	0,316
— par kilomètre-voiture	0,112 *f*

Les frais totaux d'exploitation n'ont jamais dépassé 0,500 *f* par kilomètre-train, ce qui est un chiffre très faible.

Le prix de charbon varie de 30 à 40 *f* la tonne.

Tramways de l'Étoile à Courbevoie.

§ 104. — Cette ligne, longue de 3 600 *m*, a été d'abord exploitée pendant plusieurs années par des machines à foyer ordinaires. Mais ces machines donnèrent de fort mauvais résultats par les frais considérables d'entretien qu'elles nécessitaient ; le prix de revient moyen de la traction ne cessa d'augmenter d'année en année jusqu'à atteindre le chiffre énorme de 1,007 *f* par kilomètre-train, dont plus de la moitié pour l'entretien et les réparations des moteurs. Ces dépenses considérables décidèrent la Compagnie des Tramways-Nord à revenir aux chevaux ; puis, en 1889, à effectuer la transformation de ces machines à feu en machines sans foyer, système Francq.

Depuis ce moment l'exploitation s'est faite dans de bonnes conditions économiques, malgré les circonstances assez peu favorables dans lesquelles se fait la traction, les machines transformées, déjà vieilles et usées, ne pouvant donner les résultats qu'on pourrait espérer obtenir de moteurs spécialement construits.

Les frais de traction pendant les années 1892 et 1893 ont été les suivants :

	Année 1892	Année 1893
Personnel de conduite	0,076 *f*	0,079 *f*
Production de la vapeur	0,129	0,126
Entretien du matériel	0,106	0,094
Frais généraux et divers	0,028	0,052
Totaux par kilomètre-voiture	0,339 *f*	0,351 *f*

Le nombre de kilomètres-trains a été de 659 236 en 1893.

Les machines sont de trois types différents, pesant de 6 040 à 9 000 *kg* en charge, et remorquent des trains de 2 ou 3 voitures pesant au total 22 à 28 *t*, machines comprises.

Il est assez intéressant de comparer ces résultats avec ceux qu'ont donnés la traction électrique et la traction animale sur le même réseau.

Nous avons vu que le kilomètre-voiture électrique (par accumulateur) était revenu, en 1893, à 0,542 *f* (pour la traction seule).

En ce qui concerne la traction animale, les résultats en 1892 et 1893 ont été les suivants :

	Année 1892		Année 1893	
Personnel des dépôts	0,069 *f*		0,071 *f*	
Cochers, relayeurs, côtiers, etc.	0,121		0,124	
		0,190		0,195
Entretien des chevaux, harnais, etc. .		0,078		0,070
Nourriture des chevaux		0,269		0,280
Frais généraux et divers.		0,011		0,010
Totaux par kilomètre-voiture. . . Fr.		0,548		0,556

Le service a comporté 2 743 289 kilomètres-voitures effectués par 23 366 journées de voiture et 291 683 journées de cheval.

Le prix de revient de la ration a été en moyenne de 2,25 *f* par cheval et par jour, en 1893.

On voit par la comparaison de ces différents résultats l'avantage sensible de la traction mécanique à vapeur.

Avantages et inconvénients des locomotives sans foyer.

§ 105. — Ces locomotives présentent pour la traction des tramways une supériorité incontestable sur les machines à foyer ordinaires, car elles possèdent tous les avantages de l'emploi direct de la vapeur, sans les nombreux inconvénients que donne la présence d'un foyer, et sont admises à circuler là où des locomotives ordinaires ne seraient pas souvent tolérées.

Sous le rapport économique, elles donnent lieu, toutes choses égales d'ailleurs, à des frais de premier établissement analogues et à des frais de traction sensiblement moindres :

1° Par la diminution des frais d'entretien.

2° Par une certaine économie dans les dépenses de combustible.

3° Par une légère réduction des frais de personnel dans certaines conditions d'exploitation.

En ce qui concerne la commodité et les facilités de l'exploitation, elles possèdent plus de souplesse, d'élasticité, évitent la fumée, la chaleur, les mauvaises odeurs, etc. : il n'est pas besoin

d'insister beaucoup là-dessus. En un mot, ce moteur se prête très bien à l'exploitation économique des lignes vicinales, de banlieue et de certaines petites lignes d'intérêt local. Ce système ne permet pas l'emploi de voitures automobiles, ce qui contribue à en restreindre l'emploi à l'intérieur des villes.

L'échappement de vapeur aussi peut donner lieu à des objections, quoiqu'il présente moins d'inconvénients que le mélange de fumée et de vapeur émis par les locomotives ordinaires. Mais il serait difficile de le supprimer complètement.

Le rayon d'action entre deux charges est limité, comme pour tous les systèmes analogues, à la distance que permet d'atteindre l'approvisionnement de force motrice correspondant au poids de locomotive nécessaire à l'adhérence; à poids mort égal ce rayon est à peu près le même que pour l'air comprimé, mais sensiblement inférieur à celui que permet l'emploi des accumulateurs. Il peut facilement atteindre 12 à 13 *km*, ce qui est généralement suffisant. Il serait très désavantageux d'augmenter beaucoup le poids de la locomotive, uniquement pour augmenter la distance franchissable ; il est préférable, dans ce cas, sous tous les rapports, d'augmenter le nombre des dépôts de chargement.

§ 106. — Pour augmenter le rayon d'action, sans changer le poids mort des locomotives à eau chaude, on a cherché récemment à adjoindre au grand récipient un petit foyer chargé de coke ou d'anthracite au départ, et fournissant une quantité supplémentaire de calorique, sans qu'on ait besoin de toucher au feu pendant tout le trajet. Le foyer peut être fumivore.

Des moteurs de ce genre ont été essayés dernièrement à Chicago et auraient donné satisfaction; les trajets auraient atteint 30 à 35 *km*, ce qui peut paraître un peu exagéré.

Le réchauffement de l'eau du réservoir se ferait par la vapeur, à la manière ordinaire.

Toutefois la présence d'un foyer nous paraît enlever au système une grande partie de son caractère et de ses avantages spéciaux; de pareilles machines peuvent plutôt être considérées comme rentrant dans la catégorie des locomotives à grand volume d'eau.



CHAPITRE V

Systèmes divers de traction mécanique.

§107. — Il nous reste à dire quelques mots sur certains systèmes qui ont été proposés et essayés pour la traction mécanique et qui présentent un certain intérêt théorique quoiqu'ils n'aient pas reçu d'applications industrielles.

Locomotives sans feu à lessive de soude de M. Honigmann.

§ 108. — Ces locomotives se composent d'un récipient d'eau à haute température dont la vapeur est utilisée à la production de la force motrice, mais qui reçoit pendant le trajet une transmission continue de chaleur d'une source spéciale, transmission qui combat l'abaissement de température qui tendrait à se produire dans la masse d'eau chaude.

Cette source n'est autre chose qu'une lessive de soude concentrée et le réservoir d'eau chaude affecte les dispositions d'une chaudière tubulaire ordinaire dont les parties qui seraient léchées par les gaz chauds sont précisément baignées et échauffées par cette lessive.

Le fonctionnement est basé sur la propriété que possèdent les solutions salines d'absorber la vapeur d'eau et de s'échauffer en même temps à une température supérieure à celle de la vapeur absorbée.

La vapeur servant à produire l'échauffement provient de l'échappement de la machine.

Au fur et à mesure de la production de la vapeur, la température de l'eau de la chaudière tend à s'abaisser : il y a alors transmission à travers le faisceau tubulaire, la lessive cédant son calorique à l'eau dont elle tend ainsi à maintenir la température et la pression.

D'autre part, au fur et à mesure de l'absorption la richesse de la dissolution de soude et par suite son point d'ébullition vont en

s'abaissant et il arrive un moment où ce point d'ébullition atteignant la température de la lessive, l'absorption s'arrête. Si le condenseur à soude est ouvert à l'air libre, la température de la lessive et celle de l'eau iront en s'abaissant à partir de ce moment; aussitôt qu'elle sera descendue au-dessous du point d'ébullition l'absorption de la vapeur pourra se produire à nouveau et du calorique sera transmis à la chaudière, ainsi de suite jusqu'à ce que la solution soit arrivée à un degré de dilution tel qu'elle ne puisse plus absorber de vapeur à la tension minima admise pour le fonctionnement de la chaudière. On doit alors remplacer la solution ou la concentrer à nouveau jusqu'au degré primitif.

Au lieu de laisser à l'air libre le condenseur à soude, M. Honigmann a eu l'idée de le fermer; la pression y augmente alors au fur et à mesure de la dilution de la dissolution, mais par contre le point d'ébullition, la température et la pression de la chaudière restent fixes. Il n'y a plus alors aucune espèce d'échappement.

Quand la contre-pression a atteint une certaine valeur, on concentre à nouveau la solution de soude. Dans ces conditions 1 000 *kg* de soude pourraient absorber 460 *kg* de vapeur, produits à 10 *atm*, sans que la contre-pression dépasse 2,5 *atm*.

L'inconvénient du système réside dans l'action énergique qu'exercent les lessives de soude concentrées sur la tôle de fer, action qui en amène la destruction rapide.

Cette attaque et les difficultés que donnent les manipulations d'agents chimiques à haute température aussi actifs ont empêché le système de se répandre malgré son ingéniosité, son aptitude à effectuer de longs trajets et l'avantage précieux qu'il donnait de supprimer tout échappement.

Moteurs à ammoniaque.

§ 109. — Le principe de ces moteurs est absolument le même que celui des moteurs à eau chaude. L'approvisionnement d'eau ordinaire est seulement remplacé par une dissolution ammoniacale à haute température dont les vapeurs à haute pression sont utilisées à la production de la puissance motrice. Ces vapeurs sont ensuite condensées dans un réservoir d'eau froide grâce à l'affinité de l'ammoniaque pour l'eau. Mais cette condensation dégageant beaucoup de chaleur élève bientôt la température de la dissolution et par suite la contre-pression; au contraire, le dégagement

continu de gaz abaisse la température de la dissolution chaude et la tension des vapeurs qu'elle émet. Il arrive donc un moment où l'équilibre tendant à s'établir, les solutions doivent être renouvelées. La dissolution ammoniacale pourrait être avantageusement remplacée par des récipients d'ammoniaque liquéfiée.

Nous n'avons pas besoin d'insister sur les inconvénients graves que présente l'emploi d'un gaz aussi désagréable que l'ammoniaque pour expliquer la non-réussite du système.

Moteurs à gaz.

§ 110. — On a cherché à plusieurs reprises à utiliser les moteurs à gaz et à pétrole pour la traction mécanique des tramways. Des tentatives en ce sens ont été faites notamment en Allemagne, en Angleterre et aux États-Unis.

Jusqu'à présent elles n'ont guère donné de résultats pratiques bien satisfaisants, par suite des grandes difficultés que présente pour une pareille adaptation le mécanisme encombrant et compliqué des moteurs à gaz, surtout à cause de la faculté que doit avoir le conducteur de ralentir la marche, d'en renverser le sens, d'arrêter ou de repartir à volonté.

D'autre part ces moteurs présentent, à puissance égale, un poids mort beaucoup plus considérable que les moteurs électriques, à air comprimé ou à vapeur; ils nécessitent des dispositions spéciales pour leur inflammation, pour combattre l'échauffement des cylindres, et des volants très lourds pour régulariser leur marche.

Enfin, en admettant même qu'on pût combiner un ensemble satisfaisant à ces diverses conditions, il est plus que probable que les frais de graissage et d'entretien seront infiniment plus considérables qu'avec n'importe quel autre système, le mécanisme délicat de ces moteurs se prêtant très mal à un service aussi dur et aussi irrégulier que celui des tramways.

Pour tourner la difficulté de l'application directe des moteurs à gaz à la traction mécanique, certains inventeurs ont pensé à les employer pour comprimer de l'air qui serait de suite utilisé à la commande des essieux, ou pour actionner une dynamo dont le courant serait employé dans le même but au moyen des moteurs électriques. Il n'est pas besoin de faire ressortir tout ce que de pareilles dispositions ont de peu pratique, disons même de fantaisiste.

Une solution plus intéressante et digne d'être citée est celle du moteur Conelly essayé à Saint-Louis, aux États-Unis et à Londres : la marche du moteur est régulière et continue, mais la transmission du mouvement aux essieux se fait par un plateau de friction sur lequel appuie un galet monté sur un arbre vertical attaquant les essieux par engrenages. Le galet peut se déplacer suivant un diamètre du plateau à friction, de telle sorte que la vitesse de ce dernier restant constante, on peut toutefois modifier la vitesse et le sens de rotation du galet en modifiant le point de contact. L'inflammation était obtenue par le courant d'une batterie d'accumulateurs.

Des essais ont été faits aussi à Dresde par MM. Luhrig et Schwab, qui, après plusieurs tentatives infructueuses, auraient réussi à établir dernièrement une voiture de 24 places susceptible d'effectuer un service régulier; la consommation de gaz ne serait que de 4 à 500 *l* par kilomètre-voiture. Mais même en admettant l'exactitude de ce chiffre qui nous paraît correspondre à une puissance moyenne bien minime, le gaz devant être comprimé à très forte pression dans des réservoirs, doit avoir un prix de revient assez élevé et il est peu probable que le résultat final soit avantageux, toute question d'entretien mise à part.

Malgré les espérances qu'ils ont fait naître, l'emploi des moteurs à gaz ne paraît donc pas appelé à un grand avenir en ce qui concerne la traction mécanique des tramways.

CONCLUSION

Étude comparative des différents systèmes de traction mécanique.

§ 111. — Les différents systèmes que nous avons passés en revue présentent chacun, tant au point de vue de la commodité, du confort et des facilités de l'exploitation, qu'à celui de l'économie, des avantages et des inconvénients que nous avons essayé de faire ressortir afin de guider le choix à faire dans chaque cas.

Il nous reste, pour terminer cette étude, à dire quelques mots sur la manière de faire ces comparaisons et d'en dégager les bases essentielles.

Les points de vue auxquels il faut les faire sont de deux ordres différents :

1° Points de vue techniques, concernant l'innocuité de circulation sur la voie publique, la sécurité des voyageurs, le confort, la vitesse, la sûreté, la souplesse et l'élasticité de l'exploitation;

2° Points de vue financiers, concernant l'économie des frais de premier établissement et des frais d'exploitation.

Nous devons ajouter qu'il est impossible de faire ces comparaisons d'une manière absolue, les circonstances spéciales de chaque application particulière ayant souvent une influence aussi grande que les considérations générales que nous avons essayé de développer dans cette étude.

Point de vue technique.

§ 112. — Le système par câbles funiculaires doit être rangé un peu à part dans cette comparaison. Il ne convient guère, ainsi que nous l'avons vu, que dans des cas spéciaux où il fournit alors

une des rares solutions applicables; il peut alors rendre de très grands services. L'installation de Paris-Belleville a montré ce qu'on pouvait attendre et obtenir de ce système judicieusement appliqué et rationnellement exploité; tout porte à croire qu'il pourra rendre les mêmes services dans d'autres cas semblables pouvant se présenter dans certaines villes où l'on a à relier par des communications commodes et rapides des quartiers situés à des niveaux très différents : Paris et Bruxelles, pour ne parler que de ces deux capitales, en offrent beaucoup d'exemples.

§ 113. — Les systèmes à conducteurs électriqués constituent un mode de traction qui a pour lui la vogue en ce moment; il est souple, confortable, très apprécié du public, permet de gravir des rampes très raides au moyen de voitures automobiles dont la circulation, même dans des rues étroites et sinueuses, comme par exemple celles du Havre, Saint-Adresse, est des plus faciles; pour ces motifs ce système convient très bien à la traction dans l'intérieur des villes. Mais la nécessité d'un réseau de câbles aériens avec retour par la terre présente à l'intérieur des villes de très sérieux inconvénients sur lesquels nous nous sommes déjà étendus.

Il y a là un aléa qui peut donner de graves mécomptes. Ces inconvénients seront certainement un obstacle à l'extension du système dans les grandes villes européennes où l'on est plus difficile qu'en Amérique.

Ces inconvénients sont sensiblement atténués pour les lignes suburbaines; mais alors l'emploi de voitures séparées n'est plus aussi recherché et l'emploi de l'électricité perd une partie de sa raison d'être.

Les doubles câbles souterrains employés à Buda-Pesth se prêteraient mieux à l'établissement d'un réseau urbain; mais alors on retombe dans les dépenses d'installation excessives.

Toutefois, ce système nous paraît devoir rivaliser avantageusement avec la traction funiculaire pour le service de lignes à fortes rampes, et il donnera, dans ce cas, une économie très sensible, non seulement pour les frais de première installation, mais aussi pour les frais d'exploitation. Il pourra être aussi très avantageusement employé dans certaines lignes urbaines à grand trafic quand le fil aérien ne sera pas toléré.

Par contre, ce système n'est pas à l'abri de tout inconvénient : l'isolement de la ligne est assez difficile à maintenir aux tensions

élevées; les caniveaux peuvent être noyés par de fortes pluies d'orage, comme cela est arrivé à Buda-Pesth et a forcé d'interrompre momentanément tout le service.

Des dispositions étudiées récemment avec emploi de caniveaux en fonte auraient permis de réduire considérablement le coût de ces voies; mais il n'en a pas encore été fait d'applications pratiques.

§ 114. — Les accumulateurs fournissent sous beaucoup de rapports un mode de traction idéal pour l'intérieur des villes; ils ne donnent ni fumée, ni odeur, ni échappement d'aucune sorte, donnent une traction commode, sûre, confortable, très appréciée des voyageurs et du public et peuvent circuler pendant de longues heures sans nécessiter aucune recharge.

Toutefois, on peut leur reprocher, en outre de leurs désavantages économiques, leur peu d'aptitude à gravir les rampes et à effectuer un service irrégulier avec accroissement momentané du trafic. Il est très difficile à ces automobiles de remorquer une autre voiture; en particulier celles de la ligne de Saint-Denis qui étaient prévues pour pouvoir traîner au besoin une voiture ordinaire, n'ont jamais, à notre connaissance, effectué, dans ces conditions, un trajet complet.

Les automobiles à air comprimé présentent des avantages pour le service intérieur des villes ; elles ont plus d'indépendance que les automobiles électriques et plus d'élasticité que les automobiles à accumulateurs ; pour ces motifs, elles nous paraissent, toutes choses égales d'ailleurs, préférables à ces voitures dont elles peuvent offrir la commodité et le confortable.

Toutefois, ces automobiles, sont lourdes, et fatiguent beaucoup les voies quand elles ne sont pas très solidement posées.

D'une manière générale, nous croyons, d'ailleurs, que l'on n'a souvent pas grand intérêt à faire circuler, même dans les rues des villes, des automobiles plutôt que des voitures remorquées par locomotives. Nous pensons que, dans beaucoup de cas, il est préférable de laisser à chaque partie du matériel roulant sa véritable fonction : aux voitures de porter les voyageurs, à la locomotive de les remorquer. La suspension de la caisse est plus élastique et la traction incontestablement plus douce et plus agréable ; il n'y a ni grincement d'engrenages, ni trépidations de moteur, ni chaleur, ni mauvaises odeurs qui puissent incommoder les voyageurs.

En outre, les locomotives sont plus libres pour effectuer leurs

manœuvres, pour se remplacer l'une l'autre quand elles ont épuisé leur charge, etc., sans qu'on ait à faire subir de déplacement inutile aux voyageurs, ni surtout qu'on ait à les transborder d'une automobile à une autre, au milieu du trajet, comme on le fait dans quelques applications de l'air comprimé.

Les installations de Lille, de Saint-Étienne, de Bruxelles, etc., montrent la facilité avec laquelle on peut arriver à faire circuler des trains dans des rues, même très étroites, pourvu que la circulation n'y soit pas trop intense et le passage de ces trains n'effraye pas plus les chevaux que celui d'une automobile.

§ 115. — Les locomotives à foyer ne peuvent guère être admises à l'intérieur des villes, sauf dans certains centres industriels comme Saint-Étienne, tellement enfumés par eux-mêmes, qu'ils n'ont guère à craindre une source supplémentaire de poussière et de fumée.

Mais l'utilisation directe de la vapeur dans les locomotives sans foyer présente beaucoup d'intérêt et nous paraît fournir une des meilleures solutions pour la traction des trains, surtout des trains de banlieue. Il n'y a guère à leur reprocher, comme nous l'avons vu, que leur échappement de vapeur, et si l'on met à part cet inconvénient, ces locomotives présentent, en commun avec l'air comprimé, les accumulateurs et l'électricité, toutes les qualités de propreté, confortable, rapidité, etc., qu'on peut demander à la traction mécanique.

Point de vue économique.

§ 116. — Toute affaire industrielle n'ayant pour but final qu'un résultat financier, ce point de vue est un des plus intéressants pour les Compagnies exploitantes.

Il est très difficile de tirer des déductions précises des résultats donnés par des installations déjà existantes et les comparaisons des chiffres fournis par différents systèmes appliqués à des lignes différentes n'ont bien souvent aucune valeur sérieuse.

Il est d'abord assez difficile de bien connaître les dépenses afférentes aux divers chefs, d'en dégager ce qui concerne exclusivement la traction, de manière à faire des comparaisons équitables et sur des bases identiques.

D'autre part, les conditions différentes de l'exploitation amènent de telles différences dans les résultats qu'il y a souvent plus

d'écart entre ceux donnés par deux applications différentes du même système qu'entre certaines applications de deux systèmes différents ; la bonne direction de l'exploitation doit entrer en ligne de compte d'une manière très sérieuse et on relève souvent des différences vraiment étonnantes d'une année à l'autre sur la même ligne suivant l'expérience et l'intelligence des chefs et d'autres circonstances absolument indépendantes des qualités d'un système.

Il va sans dire que le prix de la main-d'œuvre, celui du combustible, la possibilité d'utiliser une force hydraulique, d'exploiter en même temps que la traction un autre service public, comme la lumière, la solidité de la voie, la nature du profil, la fréquence du trafic sont autant de facteurs essentiels.

Aussi ne peut-on obtenir d'indications précises de simples comparaisons de résultats d'exploitation ; pour en tirer parti il faut aller plus avant et connaître tous les détails de cette exploitation et la décomposition détaillée des dépenses.

Quand on se trouve en présence d'une application nouvelle, ces comparaisons ont leur utilité ; mais il ne faut pas s'y borner ; au contraire l'intelligence et le raisonnement doivent intervenir pour apprécier la meilleure solution à choisir, solution qui ne sera pas la même dans tous les cas.

§ 117. — Le problème est généralement déterminé :

1° Par le tracé et le profil de la ligne ;

2° Par la nature de voie que les circonstances conduisent à adopter ;

3° Par l'intensité du trafic à établir, c'est-à-dire par le nombre, la capacité des voitures à mettre en circulation et le parcours journalier total qu'elles doivent effectuer.

Les données étant fixées, il s'agit d'y satisfaire avec le moindre capital initial, tout en exploitant le plus économiquement possible de manière à assurer la plus large rémunération aux capitaux engagés dans l'entreprise.

Il y a donc à comparer :

1° Les frais de premier établissement avec les différents systèmes ;

2° Les frais d'exploitation présumables.

Et ne pas oublier de tenir compte de l'amortissement pendant la durée de la concession, des frais de renouvellement ou amortissement du matériel mécanique proprement dit et de l'intérêt du capital.

Frais de premier établissement.

§ 118. — Nous bornerons leur étude à ce qui concerne plus spécialement la traction et il nous suffira de rappeler et de condenser ce que nous avons déjà dit en décrivant chaque système en particulier.

Les frais de premier établissement à imputer à la traction mécanique doivent comprendre toutes les dépenses de nature quelconque à faire pour remplacer la traction animale par un des systèmes que nous avons passés en revue.

Ils comprennent donc :

1° Les dépenses de matériel roulant spécial (soit le prix des locomotives de traction, soit la différence entre le prix des automobiles et celui des voitures qu'elles remplacent);

2° Les frais d'installation des usines fixes nécessaires : chaudières, moteurs, compresseurs, dynamos, appareils de chargement, voies spéciales, bâtiments, etc.;

3° Les frais de lignes aériennes ou souterraines et les suppléments de dépenses entraînées pour l'établissement de la voie.

Matériel roulant.

§ 119. — Nous avons vu que le prix des automobiles électriques, à accumulateurs (prix de la batterie déduit) et à air comprimé était sensiblement le même. Le poids mort des premières est plus faible, mais le prix au kilogramme est plus élevé de telle, sorte qu'il y a compensation.

Le prix des locomotives à air comprimé, à eau chaude et à vapeur est à peu près le même, à poids égal, et ce poids est déterminé par des considérations d'adhérence étrangères à la nature du système.

Enfin, dans la plupart des cas, le poids mort pour la traction par locomotives est à peu près le même qu'avec l'emploi d'automobiles.

Aussi peut-on dire qu'en ce qui concerne le matériel roulant les dépenses de premier établissement sont très sensiblement les mêmes pour tous les systèmes ; s'il y avait une légère différence

elle serait en faveur des voitures électriques, qui, n'ayant pas à se charger fréquemment, peuvent effectuer un parcours journalier un peu plus élevé, ce qui permet d'en réduire le nombre de 15 à 20 0/0.

Les dépenses de matériel roulant pour la traction peuvent s'évaluer en moyenne de *20* à *25 000 f* par voiture de 50 places en circulation.

Matériel des usines fixes.

§120. — Sur ce chapitre les différences deviennent très grandes.

Nous avons résumé dans le tableau ci-joint les puissances qu'on donne en moyenne à chaque partie de ces installations fixes, dans les différents systèmes, et pour donner un peu d'uniformité à la comparaison nous avons supposé une ligne présentant une résistance moyenne de 16 *kg* par tonne d'automobile ou de locomotive et de 12 *kg* par tonne de voiture ordinaire.

Ce tableau montre que les dépenses les plus fortes de beaucoup correspondent à l'emploi de l'air comprimé ; les systèmes électriques à conducteurs et à accumulateurs viennent ensuite sur la même ligne ; les plus faibles dépenses correspondent à l'emploi de la vapeur ; elles sont très minimes comparées aux autres.

		FIL AÉRIEN	ACCUMULATEUR	AIR COMPRIMÉ	EAU CHAUDE
Surface de chauffe des chaudières.	Par automobile de 50 pl.	12 m^2	14 m^2	22 m^2	»
	Par locomotive de 10 t...	»	»	16 m^2	9 m^2
	Par voiture de 50 places.	5 m^2	»	9 m^2	4,5 m^2
Puissance des moteurs à vapeur.	Par automobile de 50 pl.	20 *ch*	18 *ch*	35 *ch*	»
	Par locomotive de 10 t...	»	»	23 *ch*	»
	Par voiture de 50 places.	8 *ch*	»	13 *ch*	»
Puissance des dynamos.	Par automobile de 50 pl.	15000 watts	14000 watts	»	»
	Par voiture de 50 places.	6000 watts	»	»	»
Débit des compresseurs d'air.	Par automobile de 50 pl.	»	»	140 *kg*	»
	Par locomotive de 10 t. .	»	»	100 *kg*	»
	Par voiture de 50 places.	»	»	50 *kg*	»
DÉPENSES TOTALES (y compris réserves).	Par automobile de 50 pl.	18 000 *f*	18 000 *f*	35 000 *f*	»
	Par locomotive de 10 t...	»	»	23 000 *f*	4 500 *f*
	Par voiture de 50 places.	8 000 *f*	»	13 000 *f*	2 500 *f*

Ces chiffres se rapportent au nombre de voitures, automobiles et locomotives en circulation effective sur la voie, non compris celles en réserve, en chargement ou en réparation.

Ces prix s'entendent pour des installations moyennes, ayant de 8 à 20 voitures en circulation à la fois, et ne sont, bien entendu, qu'approximatifs. Ils sont plus élevés pour les petites installations et moindres pour les grandes.

Lignes, batteries d'accumulateurs, etc.

§ 121. — Ces frais ne grèvent que les systèmes électriques. Il faut compter avec les accumulateurs sur une dépense de 5 000 *f* par batterie, soit environ 12 000 *f* par voiture en circulation.

Avec le fil aérien, les dépenses sont de 20 à 30 000 *f* le kilomètre.

Avec les conducteurs souterrains, elles sont variables dans de grandes limites, mais toujours très considérables.

§ 122. — Si nous faisons la somme des différentes dépenses, nous voyons, en résumé, que les différents systèmes de traction mécanique peuvent se diviser en trois groupes :

Le premier, comprenant les funiculaires et les câbles souterrains, très chers de premier établissement, dont la plus forte partie des dépenses provient de la voie, ne pouvant, par suite, convenir qu'à des lignes à trafic très intense donnant des recettes très considérables par kilomètre de voie.

Le second groupe, comprenant les systèmes à fil aérien, à accumulateurs et à air comprimé à peu près équivalents au point de vue des dépenses de premier établissement, dépenses qui sont, en général, peu supérieures à celles de la traction animale et oscillent entre 50 et 60 000 *f* par voiture de 50 places en circulation. Ces dépenses se répartissant à peu près par moitié sur le matériel fixe et sur le matériel roulant.

Le troisième groupe, comprenant les systèmes à vapeur, très bon marché de premier établissement, ne nécessitant guère d'autres dépenses que celles du matériel roulant, pouvant rivaliser avec la traction animale sur des lignes à faible trafic où les autres systèmes ne donneraient pas de bons résultats financiers.

Frais d'exploitation.

§ 123. — Pour faciliter les comparaisons, il est bon de décomposer les frais d'exploitation relatifs à la traction en leurs éléments essentiels, de manière à dégager ceux qui donnent lieu à peu près aux mêmes dépenses pour tous les systèmes, de ceux, au contraire, qui amènent des différences notables.

Cette décomposition peut se faire avantageusement de la manière suivante :

1° Personnel et main-d'œuvre.	*a)* Personnel de conduite (machinistes). *b)* Personnel des usines fixes (mécaniciens, chauffeurs, chargeurs nettoyeurs, etc.).
2° Force motrice.	*c)* Combustible et graissage de machines fixes. *a)* Graissage du matériel roulant.
3° Entretien.	*e)* Entretien du matériel fixe. *f)* Entretien du matériel roulant.
4° Charges financières provenant du capital engagé.	*g)* Amortissement, renouvellement du matériel. *h)* Intérêt du capital.

Nous allons faire la comparaison des différents systèmes sur chacun de ces chefs :

a) *Personnel de conduite.* — Ces frais sont à peu de chose près les mêmes pour tous les systèmes, le genre de main-d'œuvre étant absolument le même. En supposant le prix de cette main-d'œuvre à 0,50 *f* l'heure, les frais de personnel de conduite grèvent le prix de revient du kilomètre-voiture de 0,04 *f* à 0,06 *f* suivant la vitesse de service.

b) *Personnel des usines fixes.* — Les frais les plus élevés sont nécessités par le système à accumulateurs, surtout si l'on fonctionne jour et nuit, ce qui nécessite des équipes doubles. L'air comprimé vient après et en dernier lieu à peu près sur la même ligne, le système à eau chaude qui ne nécessite que des chauffeurs et des chargeurs, et le système à fil aérien qui ne nécessite que

des chauffeurs et des mécaniciens-électriciens. Dans ce dernier cas, quand la même usine distribue en même temps la lumière ou quand la force motrice est empruntée à une chute d'eau, les frais de personnel de l'usine électrique ne grèvent le prix de revient du kilomètre-voiture que d'une somme très faible.

c) *Combustible et graissage du matériel fixe.* — Nous avons vu que dans le système à air comprimé, chaque kilogramme de vapeur donnait environ 8 000 *kgm* et dans les trois autres systèmes à peu près le même travail utile, soit 11 à 12 000 *kgm*. Mais les valeurs très différentes du poids mort par place offerte viennent produire de nouvelles différences dans les résultats finaux; en résumé, la consommation de charbon par kilomètre-voiture de 50 places est en moyenne :

De 3,5 *kg* à 4 *kg* avec l'emploi de l'air comprimé;
2,5 *kg* à 3 *kg* avec les systèmes à eau chaude et à accumulateurs;
2 *kg* à 2,5 *kg* avec le système à fil aérien.

En supposant le prix du charbon de 30 *f* la tonne, la dépense qui en résulte par kilomètre-voiture est de :

0,11 *f* à 0,12 *f* pour l'air comprimé;
0,08 *f* à 0,09 *f* pour l'eau chaude et le système à accumulateurs;
0,06 *f* à 0,07 *f* pour le fil aérien.

Il faut ajouter pour le graissage des machines fixes 0,005 *f* à 0,010 *f* à ces chiffres.

d) *Graissage du matériel roulant.* — La dépense est à peu près la même pour tous les systèmes; elle est, d'ailleurs, assez faible, pour que de petites variations sur ce chef n'aient qu'une influence absolument négligeable. Ces dépenses varient de 0,01 *f* à 0,02 *f* le kilomètre-voiture.

e) *Entretien du matériel fixe.* — Ces frais diffèrent peu d'un système à l'autre; ils sont peut-être un peu plus élevés pour le système à air comprimé qui nécessite le matériel mécanique le plus important, et un peu plus faibles pour le système à eau chaude, qui ne comporte qu'une batterie de chaudières. Mais comme ces dépenses sont peu considérables, en général, les différences n'ont pas grande importance en valeur absolue.

f) *Entretien du matériel roulant.* — Le système à accumulateurs se place à part à cause des frais excessifs d'entretien et de renouvellement des batteries d'accumulateurs; en y comprenant ces derniers, les dépenses totales d'entretien du matériel roulant ne sont guère inférieures à 0,18 *f* ou 0,20 *f* le kilomètre-voiture.

Pour les systèmes à air comprimé et à eau chaude, les dépenses sont à peu près les mêmes; en ce qui concerne les systèmes électriques il n'est pas très facile de se prononcer. Les premiers moteurs ont donné lieu à des frais d'entretien et de réparations élevés; mais avec les nouvelles dispositions protégeant complètement les moteurs contre la boue et la poussière, la réduction du nombre des engrenages et l'augmentation de poids donné aux voitures, il n'y a pas de raisons pour que les frais d'entretien soient plus élevés qu'avec les autres systèmes.

h, g) *Intérêt du capital, amortissement et renouvellement du matériel.* — Ces charges dépendent de l'importance des frais de première installation et de la durée du matériel dans les différents cas. En ce qui concerne le matériel fixe, la durée peut être prise à peu près la même pour les engins mécaniques que pour les engins électriques; mais en ce qui concerne le matériel roulant, les données précises manquent un peu, l'expérience sur les moteurs électriques de tramways ne durant pas en Europe depuis assez longtemps. En pratiquant l'amortissement du matériel fixe et roulant en dix ans, les charges qui en résultent pour tous les systèmes sont à peu près les suivantes :

Air comprimé.	0,10 *f* à 0,12 *f*
Systèmes électriques. . . .	0,08 *f* à 0,10 *f*
Système à eau chaude . . .	0,05 *f* à 0,07 *f*

Les dépenses d'amortissement et de renouvellement du matériel et les charges d'intérêt du capital qui viennent s'y ajouter entrent donc dans la composition du prix de revient de la traction pour une proportion très importante et qu'on a trop souvent tort de négliger.

L'emploi direct de la vapeur possède sous ce rapport un avantage très marqué sur les autres systèmes.

§ 124. — En résumé, et autant qu'il est permis de tirer des conclusions absolues sur un sujet aussi complexe :

L'emploi direct de la vapeur donnera, en général, la solution

la plus économique sous le rapport des frais de premier établissement et d'exploitation en tenant compte des charges d'amortissement. Elle conviendra très bien à la traction sur les lignes de banlieue et les petits chemins de fer d'intérêt local.

L'air comprimé, par ses qualités spéciales, convient très bien à la traction des tramways dans l'intérieur des villes, quoique sous le rapport économique il ne nous paraisse occuper que le troisième rang.

Le système électrique à fil aérien se prête parfaitement aux deux services qu'il peut effectuer d'une manière très économique; il donnera même souvent la solution la plus avantageuse sous tous les points de vue quand une chute d'eau (comme le cas s'en présente souvent dans les pays de montagnes) ou une station centrale existante permettront d'obtenir la force motrice à bon marché, ou quand des installations connexes d'éclairage électrique permettront d'avoir une meilleure utilisation des machines et du personnel.

Mais son emploi à l'intérieur de villes prête aux critiques que nous avons déjà énumérées.

Les accumulateurs donneront presque toujours la solution la plus désavantageuse au point de vue financier.

TRACTION MÉCANIQUE DES TRAMWAYS

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE II. — **Traction par l'air comprimé** (§ 55 à § 76).

CHAPITRE III. — **Traction à vapeur : Locomotives à foyer** (§ 77 à § 83).

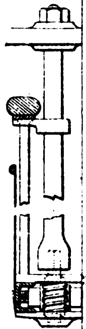
CHAPITRE IV. — **Locomotives sans foyer** (§ 84 à § 106).

CHAPITRE V. — **Systèmes divers de traction mécanique** (§ 107 à § 110).

CONCLUSION **et étude comparative des différents systèmes** (§ 111 à § 124).

IMPRIMERIE CHAIX, RUE BERGÈRE, 20, PARIS. — 18830-9-94. — (Encre Lorilleux)

14. AMV



ig.12



e: Fi

Fig. avec

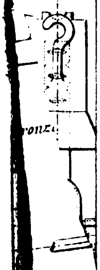


Fig. 32 enregistreur pour
eille,)

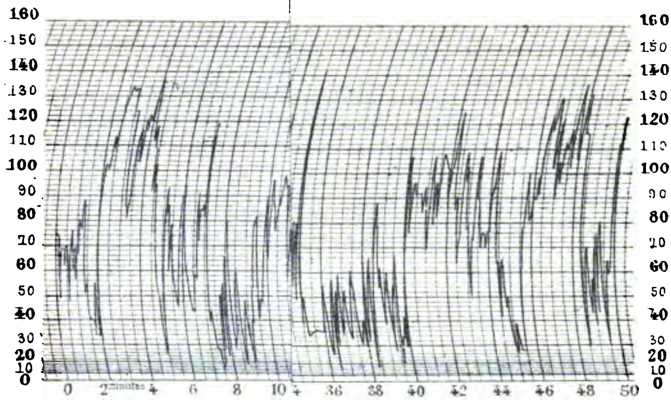


Fig. 33 N HOUSTON.

Fig. 34.

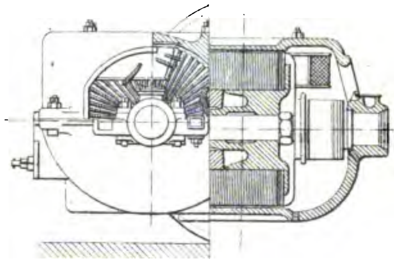
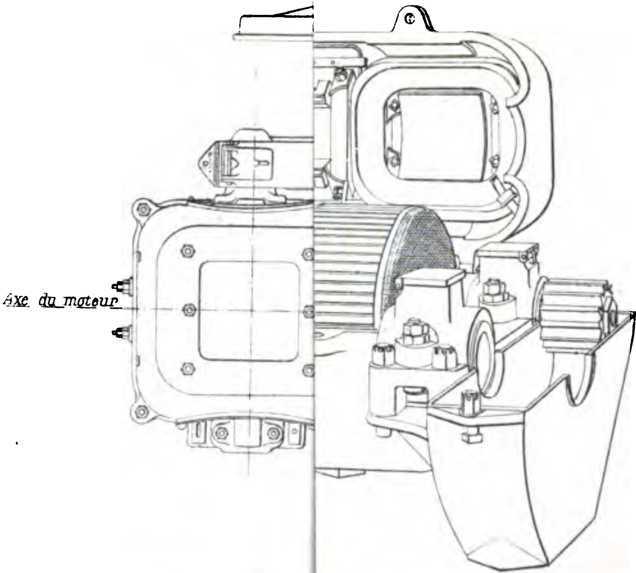


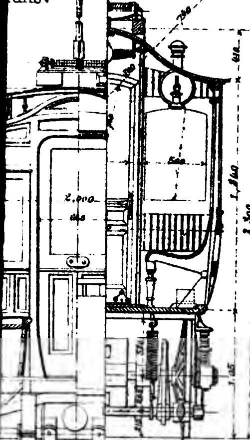
Fig. Fig. 36.



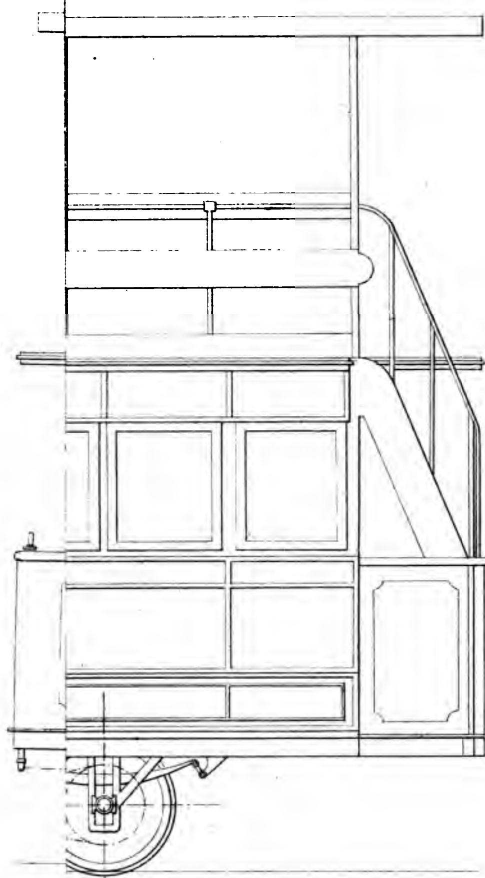
Imp. L. Courtier. 43, rue de Dunkerque. Paris.

Fig. 4 ... transversale

ansvle



...ntanée, système Serpolet.



... à 44.

Fig. 3 ...lectrique.

...ture ...places.

... 7m500 ...e Marseille)

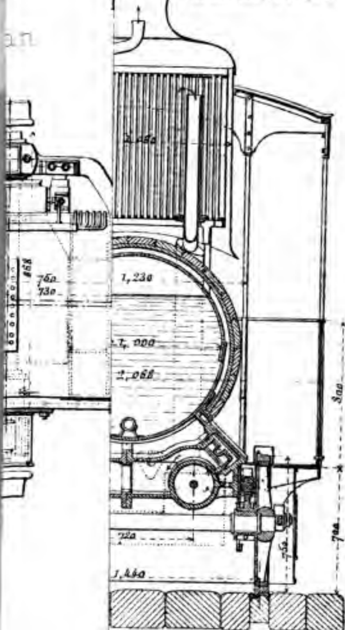
tramwa...

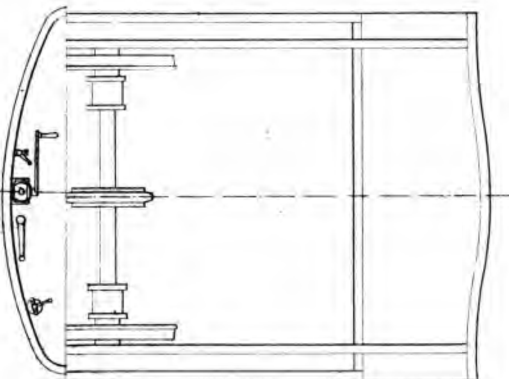
conduc... 1/60

(Cie de ... Système Francq.

Eche...

transversale





Auto-Imp. L. Courtier, 43, rue de Dunkerque. Pa...